
Merkblätter

Nr. 35

Vollzugshilfe

**Bestimmung der Festigkeit
von Abfällen**

Landesumweltamt NRW, Essen 2001

Mitglieder der LAGA-Unterarbeitsgruppe „Festigkeitsuntersuchung an Abfällen“

Dipl.-Ing. Bothmann, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg

Dipl.-Ing. Drexler, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz

Dipl.-Ing. Fritz, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

Dr. Glanz, Landesumweltamt NRW

Dipl.-Ing. Göttling, Hessische Landesanstalt für Umwelt und Geologie

Dipl.-Ing. Keil, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie

Dr. Nienhaus, Landesumweltamt NRW (Obfrau)

Dipl.-Ing. Polednik, Landesumweltamt NRW

Dipl.-Ing. Wilhelm, Thüringer Landesanstalt für Umwelt

Gast: Prof. Dr.-Ing. Düllmann, Geotechnisches Büro Prof. Dr.-Ing. H. Düllmann

Impressum

Herausgegeben vom

Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (LUA NRW)

Postfach 10 23 63 • 45023 Essen; Wallneyer Str. 6 • 45133 Essen

Telefon (02 01) 79 95 - 0 • Telefax (0201) 79 95 - 1448

e-mail: poststelle@lua.nrw.de

Essen 2001

Redaktion: Dr. Ulrike Nienhaus u. Dipl.-Ing'in Ilse Polednik,
Landesumweltamt NRW

3. Umschlagseite: CD-ROM als Beilage

Druck: Druckerei der JVA Geldern, Geldern

ISSN 0947-5788 (Merkblätter)

Gedruckt auf 100 % Altpapier ohne Chlorbleiche

Informationsdienste: Aktuelle Umweltdaten aus NRW, Fachinformationen des LUA NRW:
• **Internet** unter **www.lua.nrw.de**

Aktuelle Luftqualitätsdaten NRW:

- WDR-Videotext (3. Fernsehprogramm), Tafeln 177 bis 179
- Telefonansagedienst unter (0201) 19 700

Bereitschaftsdienst: Nachrichtensbereitschaftszentrale des LUA NRW
(24-Std.-Dienst): Telefon (0201) 71 44 88

Vorwort

Deponien stellen bedeutsame Anlagen im Rahmen eines integrierten Abfallentsorgungskonzeptes dar. Das heute bei Deponien erreichte Sicherheitsniveau ist das Ergebnis eines Entwicklungsprozesses von mehr als 3 Jahrzehnten. Neben den technischen Sicherungseinrichtungen und –maßnahmen stellt der Einbaubetrieb ein bedeutsames Element im Gesamtkonzept des Deponiebetriebes dar.

Für die Sicherstellung des Einbaubetriebes und für die Beurteilung der Deponierfähigkeit von Abfällen kommt dem kennzeichnenden Parameter *Festigkeit* eine besondere Bedeutung zu. In der Vergangenheit wurde zur Beurteilung der Ablagerungsfähigkeit von Schlämmen und pastösen Abfällen als Festigkeitskriterium häufig die Anforderung „stichfest“ angegeben. Auftretende Probleme beim Einbau der Abfälle sowie die Forderung nach eindeutigeren Kriterien und reproduzierbaren Ergebnissen führten zur Festlegung der Parameter und Zuordnungswerte im Anhang D der TA Abfall sowie in den Anhängen 1 und 2 der Abfallablagerungsverordnung (AbfAbIV) – zuvor Anhang B der TA Siedlungsabfall.

Die Umsetzung der Anforderungen aus der TA Abfall sowie aus der AbfAbIV führen in der Praxis häufig zu Fehldeutungen und somit zu nicht eindeutigen Ergebnissen. Ein wesentlicher Punkt ist insbesondere, dass die vorgegebenen Untersuchungsverfahren und die damit ermittelbaren Kenngrößen aus der Bodenmechanik übernommen wurden und diese streng genommen nur für wassergesättigte feinkörnige, d.h. bindige Bodenarten weicher bis maximal steifer Konsistenz definiert sind. Dies kann bei Anwendung auf Schlämme, pastöse Abfälle und faserige anisotrope Materialien zu Fehleinschätzungen führen. Des Weiteren spielen neben den Prüfkörperabmessungen auch die speziellen Versuchsbedingungen eine nicht zu vernachlässigende Rolle.

Es besteht daher die Aufgabe, zum Erreichen eines praktikablen und reproduzierbaren Verfahrens für Festigkeitsuntersuchungen an Abfällen die Methoden den veränderten Anforderungen der Abfallmechanik anzupassen und die Anwendungsgrenzen zu definieren. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden seit 1996 Untersuchungen im Landesumweltamt NRW zu diesem Themenkreis durchgeführt, die ab August 1997 im Rahmen eines Untersuchungsvorhabens durch das Geotechnische Büro Prof. Dr.-Ing. H. Düllmann, Aachen fortgeführt wurden.

Die Arbeiten wurden von der LAGA-Unterarbeitsgruppe „Festigkeitsuntersuchungen an Abfällen“ begleitet. Die vorliegende Vollzugshilfe enthält Handlungsempfehlungen für die Bestimmung der Festigkeit von Abfällen und hat das Ziel, den „Vollzug“ der abfallrechtlichen Vorschriften zu unterstützen. Die wissenschaftlichen Grundlagen, die Dokumentation der Versuche sowie die Einzelergebnisse sind im Gesamtbericht dargelegt; der Bericht ist der Vollzugshilfe als CD beigelegt.



Essen, im Oktober 2001

Dr. Ing. Harald Irmer
Präsident des
Landesumweltamtes
Nordrhein-Westfalen

Inhaltsverzeichnis

- 1 Veranlassung**
- 2 Rechtliche Grundlagen**
- 3 Begriffsbestimmungen**
- 4 Anwendungsbereiche/Anwendungsgrenzen**
- 5 Prüfvorschrift**
 - 5.1 Probenahme**
 - 5.2 Prüferfordernis**
 - 5.3 Versuchsdurchführung**
 - 5.3.1 Allgemeines
 - 5.3.2 Probenaufbereitung
 - 5.3.2.1 Manuelle Aufbereitung
 - 5.3.2.2 Maschinelle Aufbereitung
 - 5.4 Prüfkörperherstellung**
 - 5.4.1 Allgemeines
 - 5.4.2 Flügelscherversuch
 - 5.4.3 Einaxialer Druckversuch
 - 5.5 Prüfzeitpunkt**
 - 5.6 Versuchsdurchführung**
 - 5.6.1 Flügelscherversuch
 - 5.6.2 Einaxialer Druckversuch
 - 5.7 Versuchsauswertung/Dokumentation**
 - 5.7.1 Flügelscherfestigkeit
 - 5.7.2 Einaxialer Druckversuch
- 6 Indexparameter**
- 7 Arbeitsschutz**
- 8 Literatur**

1. Veranlassung

Für die Sicherstellung des Einbaubetriebes und für die Beurteilung der Deponierfähigkeit von Abfällen kommt der Festigkeit eine besondere Bedeutung zu. In der Vergangenheit wurde zur Beurteilung der Ablagerungsfähigkeit von Schlämmen und pastösen Abfällen als Festigkeitskriterium häufig die Konsistenz nach visueller Ansprache angegeben; hierbei galt es, die Anforderung „stichfest“ zu erfüllen. Auftretende Probleme beim Einbau der Abfälle sowie die Forderung nach eindeutigeren Kriterien und reproduzierbaren Ergebnissen führten zur Festlegung der Parameter und Zuordnungswerte im Anhang D der TA Abfall [1] sowie im Anhang B der TA Siedlungsabfall [2]. Die Anforderungen der Festigkeit von Abfällen nach TA Siedlungsabfall wurden in die Ablagerungsverordnung (AbfAbIV), Anhang 1, 2 und 3 [4] übernommen.

Die in den Technischen Anleitungen aufgeführten Parameter und Verfahren zur Bestimmung der Festigkeit von Abfällen weisen sowohl formale als auch inhaltliche Schwächen auf, die in der Praxis bei Deponiebetreibern und Prüflaboratorien zu Fehldeutungen und somit zu nicht eindeutigen Ergebnissen führen. Ein wesentlicher Punkt ist insbesondere, dass die vorgegebenen Untersuchungsverfahren und die damit ermittelbaren Kenngrößen aus der Bodenmechanik übernommen wurden und diese streng genommen nur für wassergesättigte feinkörnige, d.h. bindige Bodenarten (Abgrenzung s. DIN 18 196) weicher bis maximal steifer Konsistenz definiert sind und bei Anwendung auf Schlämme, pastöse Abfälle und faserige anisotrope Materialien zwangsläufig zu Fehleinschätzungen führen können. In der Bodenmechanik gültige Zuordnungen (z.B. $\tau_{FS} = c_u = q_u/2$) sind in der Abfallmechanik aber nur eingeschränkt gültig. Desweiteren spielen neben den Prüfkörperabmessungen auch die speziellen Versuchsbedingungen eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Der für die Herstellung der Prüfkörper maßgebende Verdichtungszustand und der maßgebende Wassergehalt – auch unter Berücksichtigung realer Deponiebedingungen – sind nicht eindeutig definiert, obwohl sie die Festigkeitsparameter τ_{FS} , q_u , c_u und die Verformung ε signifikant beeinflussen.

Aus den genannten Gründen sind zum Erreichen eines praktikablen und reproduzierbaren Verfahrens für Festigkeitsuntersuchungen an Abfällen die Methoden den veränderten Anforderungen der Abfallmechanik anzupassen und die Anwendungsgrenzen zu definieren.

2. Rechtliche Grundlagen

Die AbfAbIV in Verbindung mit der TA Siedlungsabfall und die TA Abfall enthalten in ihren Anhängen Anforderungen an die Festigkeit von Abfällen. Dabei ist die Bestimmung der dort aufgeführten Parameter gemäß der Zusammenstellung in Tabelle 1 durchzuführen. Bei nicht ausreichender Festigkeit ist eine Verfestigung zur Einhaltung der entsprechenden Zuordnungswerte zulässig.

Tab. 1: Zuordnungswerte und zugehörige Bestimmungsverfahren der AbfAbIV und der TA Abfall zur Bestimmung der Festigkeit [1], [4]

Nr.	Parameter	Zuordnungswert TA Abfall	Zuordnungswert AbfAbIV	Bestimmungsmethode TA Abfall	Bestimmungsmethode AbfAbIV
1.01	Flügelscherfestigkeit τ_{FS}	$\geq 25 \text{ KN/m}^2$	$\geq 25 \text{ KN/m}^2$	DIN 4096	DIN 4096
1.02	Axiale Verformung ¹⁾ - ε	$\leq 20 \%$	$\leq 20 \%$	DIN 18 127 ²⁾	DIN 18 136
1.03	Einaxiale Druckfestigkeit (Fließwert) ³⁾ q_u^* (q_u)	$\geq 50 \text{ KN/m}^2$	$\geq 50 \text{ KN/m}^2$	DIN 18 136	DIN 18 136

1) entspricht Stauchung gemäß DIN 18 136

2) muss richtig heißen: DIN 18 136

3) gemäß TA Abfall

3. Begriffsbestimmungen

Nachfolgend werden die in der Tabelle 1 aufgelisteten Parameter erläutert und bewertet.

Flügelscherfestigkeit τ_{FS} (Nr. 1.01):

Scherwiderstand in kN/m^2 , ermittelt mit der Labor-Flügelsonde in Anlehnung an DIN 4096.

Axiale Verformung ε (Nr. 1.02):

Nachweis, dass für eine Dauerbelastung mit dem nach Nr. 1.03 geforderten Zuordnungswert von 50 KN/m^2 die axiale Verformung $\varepsilon \leq 20 \%$ beträgt.

Einaxiale Druckfestigkeit q_u^*

Bruchwert (Nr. 1.03):

Höchstwert der einaxialen Druckspannung, $\max. \sigma$, im einaxialen Druckversuch mit konstanter Stauchungsgeschwindigkeit (DIN 18 136); bei Materialien mit nicht ausgeprägtem Bruchpunkt wird die Druckfestigkeit q_u als maximale Spannung bei Erreichen von $\varepsilon = 20 \%$ definiert.

Fließwert (Nr. 1.03 nach TA Abfall):

Höchstwert der einaxialen Druckspannung, $\max. \sigma$, im einaxialen Druckversuch bei Berücksichtigung des Zeiteinflusses (d.h. Ermittlung im Zeitstandsversuch, {Kriechversuch}).

Bei den in der AbfAbIV und der TA Abfall genannten Nachweisverfahren für die festigkeitsbezogenen Zuordnungswerte handelt es sich nicht nur um unterschiedliche Versuche, deren Ergebnisse nicht unmittelbar vergleichbar sind, sondern sie führen darüber hinaus zu unterschiedlichen Abfallbewertungen. Während mit der Flügelsondierung nur der aktuelle Flügelscherwiderstand τ_{FS} ermit-

telt wird, wird beim Festigkeitsnachweis mit dem einaxialen Druckversuch in Verbindung mit einem Zeitstandsversuch (axiale Verformung)“ auch das rheologische Verhalten des Abfalls (Langzeitverhalten unter einer Dauerbelastung mit einer Grenzlast) berücksichtigt.

Die AbfAbIV und die TA Abfall fordern für die einaxiale Druckfestigkeit damit grundsätzlich den Nachweis des Fließwertes q_u^* (Nr. 1.03). Damit werden evtl. vorhandene rheologische Fließeigenschaften in die Festigkeitsbewertung mit einbezogen. Wegen des hohen Zeitaufwandes wird der Nachweis auf die Einhaltung einer maximalen Stauchung von $\varepsilon = 20\%$ unter Dauerbelastung mit dem Zuordnungswert (Grenzfließwert) von 50 KN/m^2 beschränkt (Nr. 1.02). Daraus folgt, dass die Ermittlung des Bruchwertes q_u (einaxiale Druckfestigkeit q_u) mit dem einfachen Einaxialversuch nach DIN 18 136 erfolgt.

In der Praxis wird wegen fehlender Erläuterungen zur Versuchsdurchführung die einaxiale Druckfestigkeit häufig dahingehend interpretiert, dass mit Nr. 1.03 die einaxiale Druckfestigkeit q_u und mit Nr. 1.02 die zugehörige, im selben Versuch ermittelte Bruchstauchung ε gemeint sei.

Um eine zumindest versuchstechnische Gleichbehandlung zu erreichen, wird empfohlen, auch den Festigkeitsnachweis über den einaxialen Druckversuch ausschließlich auf die konventionelle einaxiale Druckfestigkeit q_u zu beschränken. Damit entfällt die Forderung, den Fließwert bzw. für den Grenzfließwert (Zuordnungswert) das Grenzfließverhalten zu ermitteln.

Die Berücksichtigung des rheologischen (Fließ-)Verhaltens bleibt auf Sonderfälle (s.a. Abschn. 4) beschränkt.

Im konkreten Anwendungsfall wird die Festigkeit der abzulagernden Abfälle damit durch die Bestimmung der

- Flügelscherfestigkeit τ_{FS} (in Anlehnung an DIN 4096) oder der
- einaxialen Druckfestigkeit (Bruchwert) q_u nach DIN 18 136

ermittelt.

4. Anwendungsbereiche / Anwendungsgrenzen

Flügelsondierungen und einaxiale Druckversuche dienen der Ermittlung der Gesamtscherfestigkeit des undrännierten Bodens oder Abfalls bei schnellem Abscheren. Ihre Aufteilung in die Scherparameter Reibung und Kohäsion ist nicht möglich. Eine Verwendung der gemessenen Scherfestigkeit ist nur für die erdstatischen Berechnungen möglich, bei denen die Scherfestigkeit des undrännierten Bodens oder Abfalls maßgebend ist, wobei der Reibungswinkel gleich Null gesetzt wird. Dies ist bei undrännierten, weitgehend wassergesättigten bindigen, feinkörnigen Böden oder vergleichbaren Abfallstoffen der Fall. Nur für diese Bedingungen ist auch die Beziehung $\tau_{FS} = c_u = q_u/2$ gültig.

Für nichtbindige Bodenarten oder damit vergleichbare Abfälle haben die Parameter τ_{FS} und q_u bzw. c_u keine Aussagekraft. Aufgrund der guten Entwässerbarkeit lässt sich der Anfangsgrenzzustand ($\varphi_u = 0, c_u$) nicht definieren. Damit hat auch die Beziehung $\tau_{FS} = c_u = q_u/2$ keine theoretische und praktische Grundlage. Die Festigkeit (Trag- und Scherfestigkeit) wird bei diesen Materialien nicht vom Wassergehalt sondern ausschließlich von der Lagerungsdichte gesteuert.

Die in der AbfAbIV und der TA Abfall ausgewiesenen Zahlenwerte (s. Tabelle 1) sind als untere zulässige Festigkeitsgrenzen (Mindestwerte) für die oberirdische Ablagerung von Abfällen definiert. Sie sagen nichts aus über die tatsächlich zu fordernden Werte, die sich ausschließlich auf der Grundlage von statischen Nachweisen für die Stabilität des Deponiekörpers ergeben. Mit Stabilität ist dabei gemeint, dass sowohl im Betrieb als auch im Endzustand keine kritischen Verformungs- und/oder Bruchzustände auftreten dürfen, die die Gebrauchstauglichkeit des Systems einschränken. Art und Umfang der statischen Nachweise einschließlich Sicherheitskonzept und die hierfür erforderlichen Parameter orientieren sich maßgebend am jeweiligen Deponie- und Betriebskonzept. Die für diese Stabilitätsnachweise des Gesamtbauwerkes erforderlichen Parameter lassen sich nicht nur an τ_{FS} , c_u und/oder q_u -Werten festmachen; sie können im Einzelfall umfassendere geotechnische Prüfungen beinhalten. Hierzu gehört auch die evtl. Berücksichtigung der Fließeigenschaften nach Abschn. 2. Somit reduzieren sich die Vorgaben der AbfAbIV und der TA Abfall auf Prüfgrößen, die als Indexparameter zur Beschreibung der Festigkeit im Sinne von „Konsistenz“ (Zustandsform) oder der früher nach visueller Ansprache abgeleiteten Anforderung „stichfest“ verstanden werden können.

Neben den genannten, aus der Boden- bzw. Abfallmechanik resultierenden Abhängigkeiten und Gesetzmäßigkeiten können zusätzlich auch arbeits- und versuchstechnische Einflüsse Auswirkungen auf die Zielgrößen τ_{FS} bzw. q_u (c_u) haben.

5. Prüfvorschrift

5.1 Probennahme

Die Probennahme ist gemäß den Technischen Regeln der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) PN 2/78 und PN 2/78K durchzuführen. Ergänzungen und Vereinfachungen hierzu sind im Anhang 4 der AbfAbIV und im Anhang B der TA Abfall enthalten.

5.2 Prüferfordernis

Die abzulagernden Abfälle sind gemäß DIN 4022, Teil 1 zu benennen und zu beschreiben sowie gemäß dem Klassifikationsschema nach DIN 18 196 einzugruppieren. Die labormäßige Ermittlung der Kornverteilung ist hierfür i.d.R. nicht erforderlich. Dabei gilt nach Erfahrungswerten folgendes Prüferfordernis:

a) Zu untersuchende Abfälle:

- Feinkörnige, bindige Abfälle (Anteil Korn- $\varnothing \leq 0,06$ mm: ≥ 40 %).
- Gemischtkörnige Abfälle, bei denen noch kein Stützkorngerüst der jeweils grobkörnigen Fraktionen ausgebildet ist. Die feinkörnige Bodenmatrix bestimmt das mechanische Verhalten. (Anteil Korn- $\varnothing \leq 0,06$ mm: 15 bis 40 %, Anteil Korn- $\varnothing > 2,0$ mm: ≤ 40 %).

b) Nicht zu untersuchende Abfälle:

- Grobkörnige, nicht bindige Abfälle (Sand- und/oder Kieskorn, Korn- $\varnothing \leq 0,06$ mm: < 5 %).

- Gemischtkörnige Abfälle, bei denen ein Stützkorngerüst durch die jeweils grobkörnige Fraktion ausgebildet ist (Anteil Korn- $\varnothing \leq 0,06 \text{ mm} \leq 15 \%$).
- Faserige Abfälle und i.d.R. MBA-Output mit im Vergleich zu den Prüfkörperabmessungen ungünstiger Aggregatgrößenverteilung.

Die angegebenen Massenanteile für die Abgrenzung gemischtkörniger Abfälle sind als Richtwerte zu verstehen. Der Übergang vom bindigen zu nichtbindigem Verhalten eines Abfalls ist nicht als Grenzzustand anzusehen sondern es besteht ein fließender Übergang.

5.3 Versuchsdurchführung

5.3.1 Allgemeines

Die Festigkeit kann entweder im Flügelsonden-Versuch oder im einaxialen Druckversuch ermittelt werden. Voraussetzung für die Bestimmung der Flügelscherfestigkeit τ_{FS} sowie der Einaxialen Druckfestigkeit q_u sind gleichmäßige Bedingungen bei der Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung zur Erzielung reproduzierbarer und vergleichbarer Ergebnisse.

5.3.2 Probenaufbereitung

5.3.2.1 Manuelle Aufbereitung

Das Prüfgut wird durch Kneten von Hand unter Beachtung der Sicherheitsbestimmungen (s.a. Abschn. 5.1 und 7) auf eine Teilchen- bzw. Aggregatgröße von 1/10 des Probekörperdurchmessers zerkleinert bzw. entsprechendes Überkorn (z.B. bei Gemischtkörnigen Abfällen) abgetrennt. Bei leicht verfestigten Schlämmen kann mit einem Stahllineal durch hackende Bewegungen mit der scharfkantigen Seite die Zerkleinerung durchgeführt werden. Vor der Prüfkörperherstellung ist das zerkleinerte Material zu durchmischen.

5.3.2.2 Maschinelle Aufbereitung

In Sonderfällen kann die maschinelle Aufbereitung des Prüfgutes mittels eines Rührgerätes erforderlich sein. Hierzu wird das Probenmaterial in einem handelsüblichen Rührgerät („Mörtelmischer“, Inhalt 5 Liter) mit Hilfe von Knethaken und ggf. einem zusätzlichen Flachrührer 1 Minute lang gerührt. Der Rührkessel darf maximal bis zu 50 % befüllt werden.

Zur Dokumentation sind die Angaben zum verwendeten Rührgerät (Leistungsklasse), Umdrehungszahl oder Leistungsstufe, Rührwerkzeug (Knethaken, Flachrührer) und Rührzeit anzugeben.

5.4 Prüfkörperherstellung

5.4.1 Allgemeines

Für die Durchführung von Flügelscherversuchen und Einaxialen Druckversuchen ist die Herstellung von Prüfkörpern erforderlich. Die Herstellung erfolgt mit dem nach Abschn. 5.3.2 aufbereiteten Material.

5.4.2 Flügelscherversuch

Die Herstellung des Prüfkörpers erfolgt im Standard-Proctortopf ($d_i = 100$ mm, $h = 120$ mm). Die Verdichtung erfolgt in 3 gleich dicken Lagen jeweils mit aufgelegter Stahlplatte, um eine gleichmäßige Verdichtung über die gesamte Querschnittsfläche sicherzustellen. Jede Schicht wird mit 10 Schlägen des kleinen Proctorhammers (Typ A) verdichtet. Die eingetragene Verdichtungsarbeit A entspricht damit 40 % des Standard-Proctorversuches ($A_{Pr} \sim 0,6$ MN/m³). Die Teilchen- bzw. Aggregatgröße ist auf ≤ 10 mm begrenzt.

Erforderliche Geräte:

- Standard-Proctortopf
Durchmesser $d_i = 100$ mm, Höhe $h = 120$ mm mit 50 mm hohem Aufsatzring
- Stahlplatte
Durchmesser $d = 99,5$ mm, Höhe $h = 10$ mm
- Proctorhammer (Typ A)
Fallmasse 2,5 kg, Fallhöhe 300 mm,
Durchmesser des Aufschlagstückes 50 mm.

Vor der Messung der Flügelscherfestigkeit ist die Masse des Prüfkörpers für die Ermittlung der Dichte ρ nach DIN 18 125-1 zu ermitteln. Die Wassergehaltsbestimmung nach DIN 18 121-1 ist an mindestens der Hälfte des Probenmaterials nach Abschluss der Versuche vorzunehmen.

5.4.3 Einaxialer Druckversuch

Die Herstellung der Prüfkörper erfolgt in einem gegenüber DIN 18 127 modifizierten bzw. kleineren Proctortopf. Die Verdichtung erfolgt in drei gleich dicken Lagen jeweils mit aufgelegter Stahlplatte, um eine gleichmäßige Verdichtung über die gesamte Querschnittsfläche sicherzustellen. Jede Schicht wird mit 10 Schlägen eines gegenüber DIN 18 127 modifizierten Proctorhammers verdichtet. Die volumenbezogene Verdichtungsarbeit soll in Anlehnung an DIN 18 127 40 % von $A_{Pr} = 0,6$ MN/m³ betragen. Die Teilchen- bzw. Aggregatgröße ist auf ≤ 5 mm begrenzt.

Erforderliche Geräte (s. Abb. 1):

- Verkleinerter Proctortopf
Durchmesser $d = 50$ mm, Höhe $h = 100$ mm mit 50 mm hohem Aufsatzring
($h/d = 2,0$)
- Stahlplatte
Durchmesser $d = 49,5$ mm, Höhe $h = 8$ mm
- Verkleinerter Proctorhammer
Fallmasse $M = 500$ g, Fallhöhe $H = 310$ mm,
Durchmesser des Aufschlagstückes $d = 25$ mm
Federkonstante: 0,125 KN/m.

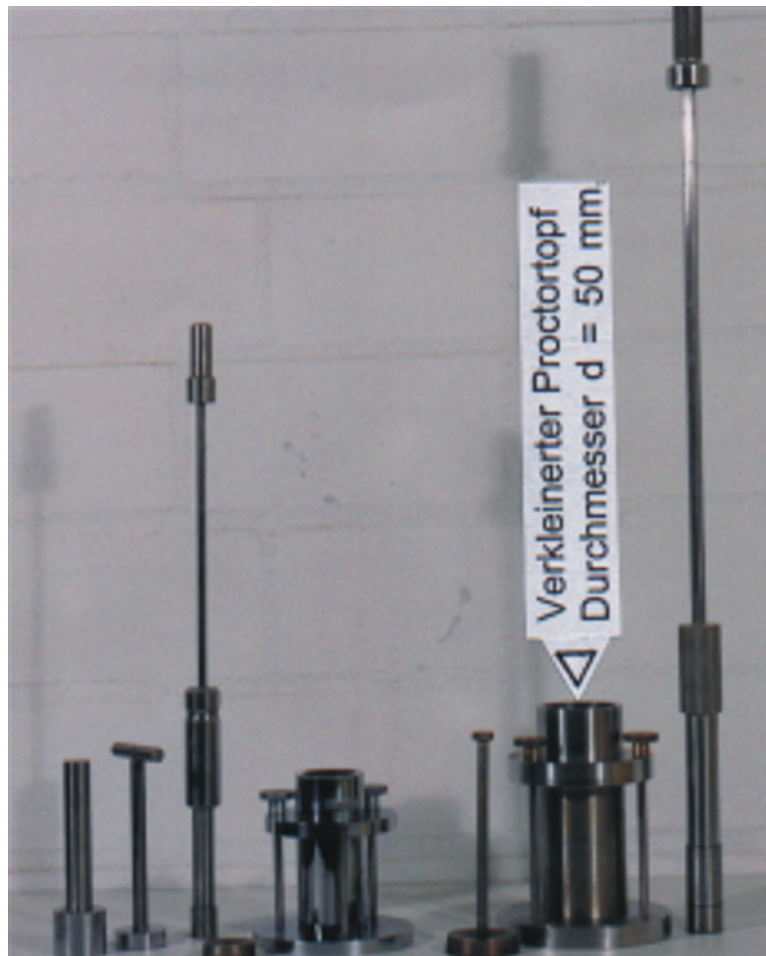


Abb. 1: Verdichtungsbehälter und -geräte zur Prüfkörperherstellung bei der Bestimmung der Einaxialen Druckfestigkeit von Schlämmen (\varnothing 50 mm)

Zur ungestörten Entnahme des Prüfkörpers aus dem Versuchszylinder empfiehlt sich die Verwendung von 2 Halbschalen als Zylinder und/oder einen Auspressbolzen von 49,5 mm Außendurchmesser und 120 mm Höhe einzusetzen. Zur Reduzierung der Mantelreibung oder Haftung sollte ein Gleitmittel oder Folie eingesetzt werden.

Vor der Messung der Einaxialen Druckfestigkeit ist die Dichte ρ nach DIN 18 125-1 zu bestimmen und nach dem Versuch eine Wassergehaltsbestimmung nach DIN 18 121-1 von mindestens der Hälfte des Probenmaterials vorzunehmen.

5.5 Prüfzeitpunkt

Die Versuche zur Bestimmung der Flügelscherfestigkeit und zur Bestimmung der Einaxialen Druckfestigkeit sollen ca. 1 Stunde nach Herstellung der Prüfkörper abgeschlossen sein.

5.6 Versuchsdurchführung

5.6.1 Flügelscherversuch

Der gemäß Abschn. 5.4.2 hergestellte Prüfkörper wird zur Versuchsdurchführung im Proctortopf belassen und in das Versuchsgerät eingesetzt. Der Flügel zur Ermittlung der Flügelscherfestigkeit soll folgende Abmessungen aufweisen:

- Durchmesser: $d = 12,5 \text{ mm } (\pm 0,3 \text{ mm})$
- Höhe: $h = 25,00 \text{ mm } (\pm 0,6 \text{ mm})$
- $h / d = 2,0$.

Die Eindringtiefe des Flügels in den verdichteten Prüfkörper soll bei jedem Einzelversuch 50 mm betragen ($= 2 \cdot h$ des Flügels). Eine Markierung an dem Flügelgestänge ermöglicht eine genaue und vergleichbare Eindringtiefe für jeden Einzelversuch (Abb. 2).

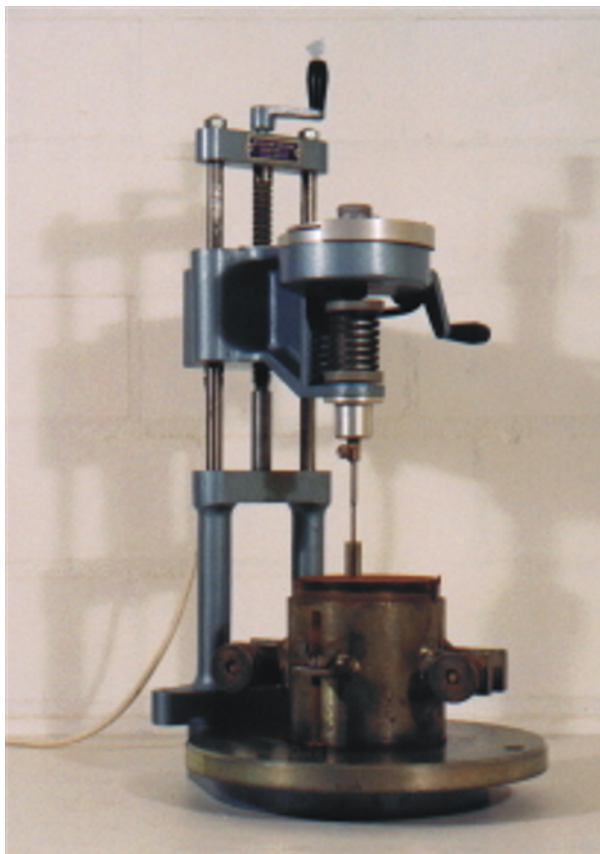


Abb. 2: Laborflügelsonde zur Messung von τ_{FS} (Flügel noch nicht in die Probe eingestochen)

Die Drehgeschwindigkeit des Flügels soll konstant $\omega = 10^\circ/\text{min}$ betragen. Die Anordnung der Einstichpunkte der 3 Einzelversuche auf der Prüfkörperoberfläche ist in Abb. 3 dargestellt.

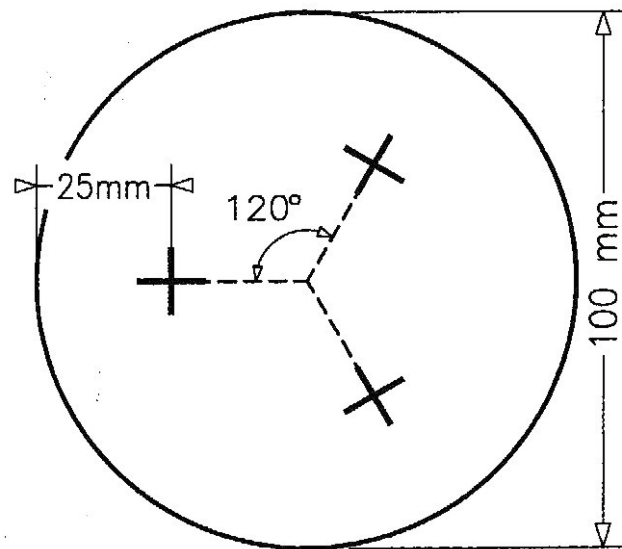


Abb. 3: Verteilung der Einzelversuche ($n = 3$) auf die Prüfkörperoberfläche

5.6.2 Einaxialer Druckversuch

Zur Bestimmung der Einaxialen Druckfestigkeit werden 3 Einzelversuche an nach Abschn. 5.4.3 hergestellten Prüfkörpern durchgeführt. Der Versuchsablauf erfolgt in Anlehnung an DIN 18 136.

Abweichend von der Norm ist unabhängig von der zu erwartenden Stauchung des Probekörpers grundsätzlich eine Vorschubgeschwindigkeit von $v = 1\%$ von h_a/min ($= 1\text{ mm/min}$) einzuhalten, mit h_a = Anfangshöhe des Prüfkörpers.

5.7 Versuchsauswertung / Dokumentation

5.7.1 Flügelscherfestigkeit

Die Flügelscherfestigkeit τ_{FS} für den Flügel nach Abschn. 5.6.1 berechnet sich nach folgendem Formelansatz:

$$\tau_{FS} = \frac{6 \cdot M}{7 \cdot \pi \cdot d^3} \quad [\text{kN/m}^2]$$

Hierin bedeuten:

D	=	Durchmesser des Flügels	[m]
M	=	maximal ermitteltes Drehmoment	[kN · m]

Die Flügelsonde ist so entworfen, dass sie nur für weiche bis maximal steife Böden geeignet ist. Damit ergibt sich als obere Grenze der Scherfestigkeit näherungsweise ein Wert von ca. 100 kN/m².

5.7.2 Einaxialer Druckversuch

Als Ergebnis ist der Mittelwert von q_u aus den 3 Einzelversuchen anzugeben:

$$q_u = \frac{F}{A_a} (1 - \varepsilon) \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

Hierin bedeuten:

F	=	max. Prüfkraft
A_a	=	Querschnitt des Probekörpers bei Versuchsbeginn
ε	=	Stauchung bei F

Bei nicht ausgeprägtem Bruchpunkt wird die maximale Prüfkraft als die Kraft festgelegt, die bei einer Grenzstauchung von $\varepsilon = 20 \%$ registriert wird.

Die Druck-Stauchungslinien der Einzelversuche sind dem Auswerteprotokoll beizufügen.

6. Indexparameter, korrelative Beziehungen

Die Festlegung von Grenzwerten für einfacher zu bestimmende Indexparameter für die Eingangskontrolle kann für ausgewählte Schlämme, die hinsichtlich ihrer chemischen Beschaffenheit, granulometrischen Zusammensetzung und Anlieferungswassergehalte nur sehr geringe Schwankungen aufweisen, sinnvoll sein. Die einfacher zu bestimmenden Indexparameter (z.B. Wassergehalt, Trockendichte ρ_d) sind häufig signifikant mit den Zielgrößen τ_{FS} oder q_u verknüpft (z.B. $q_u = f(w)$). Diese Abhängigkeiten sind auf der Grundlage der nach Abschn. 5.6 durchzuführenden Untersuchungen sowie ergänzenden Untersuchungen zur Bestimmung kennzeichnender Parameter festzulegen. Die Kontrolle kann sich dann neben der visuellen Beurteilung auf eine ausschließliche Kontrolle z.B. des Anlieferungswassergehaltes beschränken.

7. Arbeitsschutz

Vor Aufnahme der Untersuchungen ist hinsichtlich der zu untersuchenden Stoffe eine Gefährdungsbeurteilung nach der Gefahrstoffverordnung in der jeweils geltenden Fassung durchzuführen. Erste Hinweise können das Sicherheitsdatenblatt und die Deklarationsanalysen, die dem zu prüfenden Material beizufügen sind, liefern. Im Einzelfall kann es erforderlich sein, weitere Informationen zu beschaffen. Die Verantwortung für die zu ergreifenden Arbeitsschutzmaßnahmen liegen im Verantwortungsbereich der jeweiligen Prüfstelle.

Die Entsorgung der geprüften Materialien unter Einhaltung der gültigen Vorschriften ist sicherzustellen.

8. Literatur

- [1] Zweite Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall Teil 1): Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen und biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen vom 12. März 1991 (GMBI. S. 139)
- [2] Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Siedlungsabfall) - Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen vom 14. Mai 1993, BAnz. 99a
- [3] Landesumweltamt NRW: Untersuchungsvorhaben „Festigkeitsuntersuchungen von Abfällen“, Prof. Dr.-Ing. Düllmann, September 1998 (unveröffentlichter Bericht)¹
- [4] Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen und über biologische Abfallbehandlungsanlagen (Ablagerungsverordnung-AbfAbIV) vom 20. Februar 2001, BGBl. S. 305

DIN-Normen

- 4022 Teil 1 (1987) Baugrund und Grundwasser, Benennen und Beschreiben von Boden und Fels
- 4096 (1980) Baugrund; Flügelsondierung; Maße des Gerätes, Arbeitsweise, Auswertung
- 18 121 Teil 1 (1976) Baugrund; Untersuchung von Bodenproben, Wassergehalt, Bestimmung durch Ofentrocknung
- 18 125 Teil 1 (1986) Baugrund; Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Dichte des Bodens
- 18 127 (1993) Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte, Proctorversuch
- 18 136 (1987) Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte; Bestimmung der Einaxialen Druckfestigkeit, Einaxialversuch
- 18 196 (1988) Erd- und Grundbau; Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke

Technische Regeln

Richtlinie der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA): PN 2/78 - Entnahme und Vorbereitung von Proben aus festen, schlammigen und flüssigen Abfällen.

Richtlinie der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA): PN 2/78 K - Grundregeln für die Entnahme von Proben aus Abfällen und abgelagerten Stoffen.

¹ Der Bericht steht im Zusammenhang mit den Beratungen in der Unterarbeitsgruppe „Festigkeitsuntersuchungen von Abfällen“, die im Auftrag der LAGA-AG „Vollzugsprobleme der TA Abfall“ tätig war.

Seit 1. April 1994 sind bisher folgende Merkblätter im Landesumweltamt NRW erschienen:

1	Bestimmung von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) in Bodenproben	15,00 DM
2	Betrieb und Unterhaltung von mechanisch-biologischen Kläranlagen	15,00 DM
3	Abwasserbeseitigung im Außenbereich (Kleinkläranlagen)	15,00 DM
4	Leitfaden für die Abwicklung der Luftreinhalteplanung in NRW	15,00 DM
5	Leitfaden für die Vorgehensweise bei akuten Dioxin-Schadensfällen	15,00 DM
6	Bestimmung von 6 polychlorierten Biphenylen (PCB) in Böden, Schlämmen, Sedimenten und Abfällen	15,00 DM
7	Anforderungen an die Verwendung von Stahlwerksschlacken im Wasserbau	15,00 DM
8	Anforderungen an biologische Bodenbehandlungsanlagen nach dem Mietenverfahren	20,00 DM
9	Anforderungen an Sachverständige bei der Bearbeitung von Altlasten (Stand Juli 1997)	15,00 DM
10	Geräuschimmissionsprognose von Sport- und Freizeitanlagen – Berechnungshilfen –	15,00 DM
11	Richtlinie – Schnittstellenspezifikation für die Vorlage von Betriebskenndaten bei der nach § 3 Abs. 1 zuständigen Behörde gemäß Deponieselbstüberwachungsverordnung	30,00 DM
12	Merkblatt zur Anwendung der TA Siedlungsabfall bei Deponien	30,00 DM
13	Bemessung kommunaler Kläranlagen – Hinweise für die Bemessung von Belebungsanlagen mit dem Programm ARA-BER (Version 4.0)	15,00 DM
14	Gewässerstrukturgüte in Nordrhein-Westfalen Kartieranleitung	30,00 DM
15	Simulation kommunaler Kläranlagen – Hinweise zur Anwendung der dynamischen Simulation am Beispiel von SIMBA –	20,00 DM
16	Referenzgewässer der Fließgewässertypen Nordrhein-Westfalens	30,00 DM
17	Leitbilder für kleine bis mittelgroße Fließgewässer in Nordrhein-Westfalen Gewässerlandschaften und Fließgewässertypen	30,00 DM
18	Ökologische Durchgängigkeit von Hochwasserrückhaltebecken	20,00 DM
19	Anforderungen an raumlufttechnische Maßnahmen mit Gasabscheidung in Chemischreinigungen	20,00 DM
20	Empfehlungen für die Durchführung und Auswertung von Säulenversuchen gemäß Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV)	20,00 DM
21	Praxisleitfaden zum Einsatz der Ionenmobilitätsspektrometrie bei der Untersuchung von Rüstungsaltlasten	25,00 DM
22	Weitere Sachverhaltsermittlung bei Überschreitung von Prüfwerten nach der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung für die Wirkungspfade Boden – Mensch und Boden – Nutzpflanze	30,00 DM
23	Abwasserbehandlung in Pflanzenanlagen	20,00 DM
24	Leitfaden zur Erstellung digitaler Bodenbelastungskarten – Teil I: Außenbereiche	30,00 DM
25	Leitfaden zur Prognose von Geräuschen bei der Be- und Entladung von LKW	30,00 DM
26	Gewässerstrukturgüte in Nordrhein-Westfalen Anleitung für die Kartierung mittelgroßer bis großer Fließgewässer	30,00 DM
27	Umweltgerechte Entsorgung lösemittelhaltiger Textilflusen aus Chemischreinigungen	25,00 DM
28	Analytische Qualitätssicherung (AQS) für die Wasseranalytik in NRW	30,00 DM
29	Referenzgewässer der Fließgewässertypen Nordrhein-Westfalens Teil 2: Mittelgroße bis große Fließgewässer – Gewässerabschnitte und Referenzstrukturen	40,00 DM

30	Klassifikation der aquatischen Makrophyten der Fließgewässer von Nordrhein-Westfalen gemäß den Vorgaben der EU-Wasser-Rahmen-Richtlinie	30,00 DM
31	Leitfaden zur Durchführung der Abwasserprobenahme in NRW	25,00 DM
32	Vegetationskundliche Leitbilder und Referenzgewässer für die Ufer- und Auenvegetation der Fließgewässer von Nordrhein-Westfalen	30,00 DM
33	Leitfaden für die Beurteilung des Emissionspotenzials von Altdeponien	10,00 €
34	Leitbilder für die mittelgroßen bis großen Fließgewässer in Nordrhein-Westfalen – Flusstypen –	20,00 €
35	Vollzugshilfe – Bestimmung der Festigkeit von Abfällen	15,00 €

Festigkeitsuntersuchungen an Abfällen

- **Darstellung der abfallmechanischen und versuchstechnischen Grundlagen**
- **Ergebnisse von Untersuchungen an ausgewählten feinkörnigen Abfällen**
- **Anwendungsgrenzen und Handlungsempfehlungen**

Bearbeitung: Geotechnisches Büro Prof. Dr.-Ing. H. Düllmann,
Aachen

Auftraggeber: Landesumweltamt NRW
Postfach 10 23 63
45023 Essen

Untersuchungsbericht zum LUA-Merkblatt Nr. 35

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung.....	5
2	Rechtliche Grundlagen.....	7
3	Begriffsbestimmungen.....	8
4	Boden- und abfallmechanische Grundlagen.....	9
4.1	Klassifizierung nach Korngruppen und plastischen Eigenschaften (DIN 18 196).....	10
4.1.1	Grobkörnige Böden.....	12
4.1.2	Gemischtkörnige Erdstoffe.....	12
4.1.3	Feinkörnige Böden.....	13
4.1.4	Organogene und organische Böden.....	15
4.2	Definition der „Festigkeit“ nichtbindiger Böden.....	15
4.2.1	Lagerungsdichte.....	15
4.2.2	Scherfestigkeit.....	16
4.2.3	Zusammendrückbarkeit.....	18
4.2.4	Beziehung zwischen Klassifikationsgruppen, Lagerungsdichte und Scherfestigkeit nichtbindiger Böden.....	19
4.3	Definition der „Festigkeit“ bindiger Böden.....	20
4.3.1	Zustands- oder Konsistenzzahl I_C	20
4.3.2	Scherfestigkeit.....	23
4.3.2.1	Anfangszustand für unvorbelastete bindige Erdstoffe (c_u, φ_u).....	23
4.3.2.1.1	Einfluss des Wassergehaltes auf die nichtentwässerte Kohäsion c_u ..	26
4.3.2.1.2	Einfluss der Schergeschwindigkeit auf die nicht entwässerte Kohäsion c_u	28
4.3.2.1.3	Sensitivität und Thixotropie.....	30
4.3.2.2	Endzustand für entwässerte Bedingungen (φ', c').....	32
4.3.3	Zusammendrückbarkeit.....	32
4.3.4	Beziehungen zwischen Klassifizierungsgruppen, Konsistenz und nichtentwässerter Kohäsion c_u bzw. 1-axialer Druckfestigkeit q_u	33
4.3.5	Bedeutung der Grenzzustände für Deponiebetrieb und -entwurf.....	36

5	Versuchstechnische Grundlagen.....	36
5.1	Vorbemerkungen	36
5.1.1	Dreiaxialer Scherversuch (DIN 18 137).....	37
5.1.2	Einaxialer Druckversuch (DIN 18 136).....	38
5.1.3	Flügelscherversuch	41
5.1.3.1	Insitu-Versuch (Feldsonde nach DIN 4096).....	41
5.1.3.2	Laborflügelsonde	45
5.1.4	Sonderverfahren.....	48
5.1.4.1	Lastplattendruckversuch	48
5.1.4.2	Druck- und Fallkegelversuch.....	49
5.1.4.3	Proctornadel.....	51
5.1.4.4	Belastungsversuch mit definierter Grenzlast.....	52
5.1.5	Verdichtungsversuch nach Proctor	52
5.1.6	Beziehung zwischen Verdichtung nach Proctor, Einbauwassergehalt und Bodenfestigkeit.....	57
5.1.7	Maßgebende Einflussgrößen und Schlussfolgerungen für eine Vereinheitlichung der Versuchsdurchführung.....	59
6	Ergebnisse von Laborversuchen.....	62
6.1	Ausgewählte Materialien	62
6.2	Untersuchungsprogramm	62
6.3	Ergebnisse	63
6.3.1	Klassifikation nach DIN 18 196	63
6.3.2	Ausgangswassergehalte	65
6.3.3	Korndichten	65
6.3.4	Scherfestigkeit	65
6.3.4.1	Entwässerte Bedingungen (ϕ' , c').....	65
6.3.4.2	Nicht entwässerte Bedingungen (Anfangsgrenzzustand) (c_u , q_u).....	66
7	Schlussfolgerungen und Anwendungsgrenzen.....	85
8	Handlungsempfehlung, Prüfvorschrift	89
8.1	Probennahme	89
8.2	Prüferfordernis	89
8.3	Versuchsdurchführung	90

8.3.1	Allgemeines	90
8.3.2.1	Manuelle Aufbereitung.....	90
8.3.2.2	Maschinelle Aufbereitung	91
8.4	Prüfkörperherstellung.....	91
8.4.1	Allgemeines	91
8.4.2	Flügelscherversuch	91
8.4.3	Einaxialer Druckversuch	92
8.5	Prüfzeitpunkt	93
8.6	Versuchsdurchführung	94
8.6.1	Flügelscherversuch	94
8.6.2	Einaxialer Druckversuch	95
8.7	Versuchsauswertung / Dokumentation.....	95
8.7.1	Flügelscherfestigkeit.....	95
8.7.2	Einaxialer Druckversuch	96
8.8	Indexparameter, korrelative Beziehungen.....	96
8.9	Arbeitsschutz.....	97
9	Literaturverzeichnis.....	98

1 **Veranlassung**

Für die Sicherstellung des Einbaubetriebes und für die Beurteilung der Deponierfähigkeit von Abfällen kommt der Festigkeit eine besondere Bedeutung zu. In der Vergangenheit wurde zur Beurteilung der Ablagerungsfähigkeit von Schlämmen und pastösen Abfällen als Festigkeitskriterium häufig die Konsistenz nach visueller Ansprache angegeben; hierbei galt es, die Anforderung „stichfest“ zu erfüllen. Auftretende Probleme beim Einbau der Abfälle sowie die Forderung nach eindeutigeren Kriterien und reproduzierbaren Ergebnissen führten zur Festlegung der Parameter und Zuordnungswerte im Anhang D der TA Abfall [1] sowie im Anhang B der TA Siedlungsabfall [2]. Die Anforderungen der Festigkeit von Abfällen nach TA Siedlungsabfall wurden in die Abfallablagerechtsverordnung (AbfAbIV), Anhang 1, 2 und 3 [4] übernommen.

Die in den Technischen Anleitungen aufgeführten Parameter und Verfahren zur Bestimmung der Festigkeit von Abfällen weisen sowohl formale als auch inhaltliche Schwächen auf, die in der Praxis bei Deponiebetreibern und Prüflaboratorien zu Fehldeutungen und somit zu nicht eindeutigen Ergebnissen führen. Ein wesentlicher Punkt ist insbesondere, dass die vorgegebenen Untersuchungsverfahren und die damit ermittelbaren Kenngrößen aus der Bodenmechanik übernommen wurden und diese streng genommen nur für wassergesättigte feinkörnige, d.h. bindige Bodenarten (Abgrenzung s. DIN 18 196) weicher bis maximal steifer Konsistenz definiert sind und bei Anwendung auf Schlämme, pastöse Abfälle und faserige anisotrope Materialien zwangsläufig zu Fehleinschätzungen führen können. In der Bodenmechanik gültige Zuordnungen (z.B. $\tau_{FS} = c_u = q_u/2$) sind in der Abfallmechanik aber nur eingeschränkt gültig. Des Weiteren spielen neben den Prüfkörperabmessungen auch die speziellen Versuchsbedingungen eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Der für die Herstellung der Prüfkörper maßgebende Verdichtungszustand und der maßgebende Wassergehalt – auch unter Berücksichtigung realer Deponiebedingungen – sind nicht eindeutig definiert, obwohl sie die Festigkeitsparameter τ_{FS} , q_u , c_u und die Verformung ε signifikant beeinflussen.

Aus den genannten Gründen sind zum Erreichen eines praktikablen und reproduzierbaren Verfahrens für Festigkeitsuntersuchungen an Abfällen die Methoden den veränderten Anforderungen der Abfallmechanik anzupassen und die Anwendungsgrenzen zu definieren.

Des Weiteren soll der Versuch unternommen werden, für typische, in größeren Mengen anfallende Schlämme auf der Grundlage von Grundsatzprüfungen und nachgeschalteten Auswertungen die nur

mit relativ großem technischen Aufwand zu ermittelnden Kenngrößen durch einfachere Indexparameter (z.B. Trockensubstanz (TS), Wassergehalt (WG)) darzustellen und hierfür Gültigkeitsgrenzen anzugeben.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurden bereits 1996 im LUA NRW begonnene Untersuchungen zu diesem Themenkreis ab August 1997 durch das Geotechnische Büro Prof. Dr.-Ing. H. Düllmann, Aachen, weitergeführt. Das Gesamtvorhaben gliedert sich in 3 Untersuchungs- bzw. Bearbeitungsschritte, die aufeinander aufbauen.

Schritt 1: Darstellung der boden- und abfallmechanischen Grundlagen sowie des Standes praktischer und wissenschaftlicher Erkenntnisse zu dem anstehenden Themenkomplex auf der Grundlage der bestehenden Technischer Anleitungen TA Abfall und TA Siedlungsabfall sowie der Abfallablagerungsverordnung, DIN-Normen, Literaturangaben, eigener praktischer Laborerfahrungen und der von der LAGA-UAG "Festigkeitsuntersuchungen" bereits zusammengestellten und kommentierten Untersuchungen und Unterlagen.

Schritt 2: Laborative Untersuchung repräsentativer Schlämme mit:

- Klassifizierung nach Korngruppen und plastischen Eigenschaften (DIN 18 196)
- Festigkeitsuntersuchungen mittels
 - einaxialer Druckversuche q_u nach DIN 18 136 unter Variation der Prüfkörperabmessung, Herstellung der Prüfkörper und Versuchsbedingungen (z.B. Belastungs- und Verformungsgeschwindigkeit),
 - Scherwiderstand τ_{FS} (Laborflügelsonde) unter Variation von Flügelabmessungen und Schergeschwindigkeit/Winkelgeschwindigkeit.

Schritt 3: Auswertung der Untersuchungen nach 2., Aufzeigen signifikanter Beziehungen zwischen einzelnen Parametern (z.B. $c_u = f(TS, WG)$) und Erarbeitung von Prüfvorschriften einschließlich Angabe der von Anwendungsgrenzen.

Nachfolgend werden die Ergebnisse dieser Einzelschritte zusammengefasst dargestellt und bewertet.

2 Rechtliche Grundlagen

Die AbfAbIV in Verbindung mit der TA Siedlungsabfall und die TA Abfall enthalten in ihren Anhängen Anforderungen an die Festigkeit von Abfällen. Dabei ist die Bestimmung der dort aufgeführten Parameter gemäß der Zusammenstellung in Tabelle 1 durchzuführen. Bei nicht ausreichender Festigkeit ist eine Verfestigung zur Einhaltung der entsprechenden Zuordnungswerte zulässig.

Tab. 1: Zuordnungswerte und zugehörige Bestimmungsverfahren der AbfAbIV und der TA Abfall zur Bestimmung der Festigkeit [1], [4]

Nr.	Parameter	Zuordnungswert TA Abfall	Zuordnungswert AbfAbIV	Bestimmungsmethode TA Abfall	Bestimmungsmethode AbfAbIV
1.01	Flügelscherfestigkeit τ_{FS}	$\geq 25 \text{ KN/m}^2$	$\geq 25 \text{ KN/m}^2$	DIN 4096	DIN 4096
1.02	Axiale Verformung ¹⁾ - ϵ	$\leq 20 \%$	$\leq 20 \%$	DIN 18 127 ²⁾	DIN 18 136
1.03	Einaxiale Druckfestigkeit (Fließwert) ³⁾ q_u^* (q_u)	$\geq 50 \text{ KN/m}^2$	$\geq 50 \text{ KN/m}^2$	DIN 18 136	DIN 18 136

¹⁾ entspricht Stauchung gemäß DIN 18 136

²⁾ muss richtig heißen: DIN 18 136

³⁾ gemäß TA Abfall

3 Begriffsbestimmungen

Nachfolgend werden die in der Tabelle 1 aufgelisteten Parameter erläutert und bewertet.

Flügelscherfestigkeit τ_{FS} (Nr. 1.01):

Scherwiderstand in kN/m^2 , ermittelt mit der Labor-Flügelsonde in Anlehnung an DIN 4096.

Axiale Verformung ε (Nr. 1.02):

Nachweis, dass für eine Dauerbelastung mit dem nach Nr. 1.03 geforderten Zuordnungswert von 50 KN/m^2 die axiale Verformung $\varepsilon \leq 20 \%$ beträgt.

Einaxiale Druckfestigkeit q_u^*

- *Bruchwert* (Nr. 1.03):
Höchstwert der einaxialen Druckspannung, max. σ , im einaxialen Druckversuch mit konstanter Stauchungsgeschwindigkeit (DIN 18 136); bei Materialien mit nicht ausgeprägtem Bruchpunkt wird die Druckfestigkeit q_u als maximale Spannung bei Erreichen von $\varepsilon = 20 \%$ definiert.
- *Fließwert* (Nr. 1.03 nach TA Abfall):
Höchstwert der einaxialen Druckspannung, max. σ , im einaxialen Druckversuch bei Berücksichtigung des Zeiteinflusses (d.h. Ermittlung im Zeitstandsversuch, {Kriechversuch}).

Bei den in der AbAbIV und der TA Abfall genannten Nachweisverfahren für die festigkeitsbezogenen Zuordnungswerte handelt es sich nicht nur um unterschiedliche Versuche, deren Ergebnisse nicht unmittelbar vergleichbar sind, sondern sie führen darüber hinaus zu unterschiedlichen Abfallbewertungen. Während mit der Flügelsondierung nur der aktuelle Flügelscherwiderstand τ_{FS} ermittelt wird, wird beim Festigkeitsnachweis mit dem einaxialen Druckversuch in Verbindung mit einem Zeitstandsversuch (axiale Verformung)“ auch das rheologische Verhalten des Abfalls (Langzeitverhalten unter einer Dauerbelastung mit einer Grenzlast) berücksichtigt.

Die AbAbIV und die TA Abfall fordern für die einaxiale Druckfestigkeit damit grundsätzlich den Nachweis des Fließwertes q_u^* (Nr. 1.03). Damit werden evtl. vorhandene rheologische Fließeigen-

schaften in die Festigkeitsbewertung mit einbezogen. Wegen des hohen Zeitaufwandes wird der Nachweis auf die Einhaltung einer maximalen Stauchung von $\varepsilon = 20 \%$ unter Dauerbelastung mit dem Zuordnungswert (Grenzfließwert) von 50 KN/m^2 beschränkt (Nr. 1.02). Daraus folgt, dass die Ermittlung des Bruchwertes q_u (einaxiale Druckfestigkeit q_u) mit dem einfachen Einaxialversuch nach DIN 18 136 erfolgt.

In der Praxis wird wegen fehlender Erläuterungen zur Versuchsdurchführung die einaxiale Druckfestigkeit häufig dahingehend interpretiert, dass mit Nr. 1.03 die einaxiale Druckfestigkeit q_u und mit Nr. 1.02 die zugehörige, im selben Versuch ermittelte Bruchstauchung ε gemeint sei.

Um eine zumindest versuchstechnische Gleichbehandlung zu erreichen, wird empfohlen, auch den Festigkeitsnachweis über den einaxialen Druckversuch ausschließlich auf die konventionelle einaxiale Druckfestigkeit q_u zu beschränken. Damit entfällt die Forderung, den Fließwert bzw. für den Grenzfließwert (Zuordnungswert) das Grenzfließverhalten zu ermitteln.

Die Berücksichtigung des rheologischen (Fließ-)Verhaltens bleibt auf Sonderfälle (s.a. Abschn. 4) beschränkt.

Im konkreten Anwendungsfall wird die Festigkeit der abzulagernden Abfälle damit durch die Bestimmung der

- Flügelscherfestigkeit τ_{FS} (in Anlehnung an DIN 4096)
oder der
- einaxialen Druckfestigkeit (Bruchwert) q_u nach DIN 18 136

ermittelt.

4 Boden- und abfallmechanische Grundlagen

Im Folgenden werden die wesentlichen Kriterien für die Klassifizierung und für die Beurteilung des Begriffes „Festigkeit von Erd- und Abfallstoffen“ behandelt. Gleichzeitig werden die Gültigkeitsbereiche und Anwendungsgrenzen der in der AbfAbIV, und der TA Abfall verwendeten Kenngrößen aufgezeigt.

4.1 Klassifizierung nach Korngruppen und plastischen Eigenschaften (DIN 18 196)

In Tab. 4.1 sind die für erdbau- und deponietechnische Belange relevanten Klassifikationsgruppen von Böden angegeben. Sie sind in erster Näherung auch auf mineralische Abfälle übertragbar. Die Einteilung erfolgt ausschließlich nach stofflichen Merkmalen, da diese die physikalischen Grundeigenschaften vorrangig beeinflussen:

- Korngruppen nach Art und Anteil,
- plastische Eigenschaften, und
- organische Bestandteile.

Die Einordnung der Böden in die Klassifikationsgruppen kann im vereinfachten Verfahren mit visuellen und manuellen Prüfverfahren erfolgen (s. DIN 4022). Nur wenn diese nicht ausreichen, müssen ergänzende Laborversuche (z.B. Kornverteilung, Wassergehalt und Konsistenzgrenzen, Glühverlust) herangezogen werden.

Die Beschaffenheit des zu einer bestimmten Klassifikationsgruppe gehörenden Materials verändert sich durch verschiedene variable Parameter, wie z.B. Wassergehalt und Lagerungsdichte. Der Einfluss dieser Variablen ist jedoch je nach bau- und deponietechnischem Anwendungsbereich sehr unterschiedlich. Sie werden deshalb nicht als zusätzliche Klassifikationskriterien verwendet, sondern zweckmäßigerweise erst im speziellen Fall durch einschränkende Grenzbedingungen (s. a. Abschn. 2, Tab. 2.1) festgelegt.

Tab. 4.1: Bodenklassifikation nach DIN 18196

Hauptgruppe	d in mm		Gruppe	Kurzzeichen
	< 0,06	> 2,0		
grobkörnige Böden	≤ 5 %	> 40 % ≤ 40 %	Kies, Kies-Sand-Gemisch Sand, Sand-Kies-Gemisch	GE GI GW SE SI SW
gemischtkörnige Böden	5-40%	> 40 %	Korn < 0,06 mm: Kies-Schluff-Gemisch 5-15 % Kies-Ton-Gemisch 15-40 % 5-15 % 15-40 %	GU - GÜ GT - G \bar{T}
		≤ 40 %	Sand-Schluff-Gemisch 5-15 % Sand-Ton-Gemisch 15-40 % 5-15 % 15-40 %	SU SÜ ST S \bar{T}
feinkörnige Böden	>40 %		Schluff $I_p \leq 4\%$ ¹⁾ : leichtplast. $w_L \leq 35\%$ mittelplast. $> 35-50\%$	UL UM
			Ton $I_p \geq 7\%$ ²⁾ : leichtplast. $w_L \leq 35\%$ mittelplast. $> 35-50\%$ ausgepr. plast. $> 50\%$	TL TM TA
organogene Böden, Böden mit org. Beimengungen	>40 %		Schluff $I_p \geq 7\%$ ³⁾ : $w_L = 35-50\%$ Ton $I_p \geq 7\%$ ³⁾ : $w_L > 50\%$	OU OT
	≤ 40 %		grob-, gemischtkörnige Böden mit humosen, kalkig, kiesigen Beimengungen	OH OK
organische Böden			Torf, nicht bis mäßig zersetzt $Z = 1-5$ ⁴⁾ Torf, zersetzt $Z = 6-10$ Mudde	HN HZ F
Auffüllungen			Böden Fremdstoffe	[...] A

- 1) oder unter A-Linie
2) und über A-Linie } nach Abb. 4.2
3) und unter A-Linie
4) Z Zersetzungsgrad

4.1.1 Grobkörnige Böden

Die Einteilung der grobkörnigen Böden erfolgt nach dem Feinkornanteil unter 0,06 mm (weniger als 5 %) sowie dem Sand- und/oder Kiesanteil nach der Kornverteilung bzw. nach der visuellen Ansprache.

4.1.2 Gemischtkörnige Erdstoffe

Die gemischtkörnigen Böden werden nach den Anteilen an Feinkorn, Sand- und Kieskorn eingeteilt; das Feinkorn wird dabei nach Schluff und Ton zusammengefasst und mit Anteilen unter 0,06 mm von 5 - 15 % und von mehr als 15- 40 % unterschieden. Der Grenzwert von 15 % kennzeichnet näherungsweise den Übergang zwischen bindigem und nichtbindigem Verhalten der Erdstoffe. Unterhalb dieses Wertes besteht ein Stützkorngerüst der jeweils grobkörnigen Fraktionen, das sich maßgeblich auf die Eigenschaften des Bodens auswirkt.

Tatsächlich handelt es sich allerdings um einen fließenden Übergang innerhalb eines Bereichs von 10 bis 40 % Kornanteil unter 0,06 mm, wobei sich die genaue Grenze im Einzelfall nach Korngrößenverteilung und plastischem Verhalten des Feinkorns sowie nach der physikalischen Eigenschaft, die betrachtet wird, richtet. Sie ist im konkreten Anwendungsfall von einer geotechnischen Fachkraft festzulegen. Der Anteil von 40 % grenzt die gemischtkörnigen von den feinkörnigen Bodenarten ab.

In Abb. 4.1 ist zusätzlich eine Einteilung der gemischtkörnigen Böden in Abhängigkeit vom Feinkornanteil ($< 0,02$ mm) und von der Steilheit der Körnungskurve $U^* = d_{80}/d_{30}$ (LEUSSINK et al., 1964) vorgenommen worden (U^* ist nicht zu verwechseln mit $U = d_{60}/d_{10}$ nach DIN 18 196).

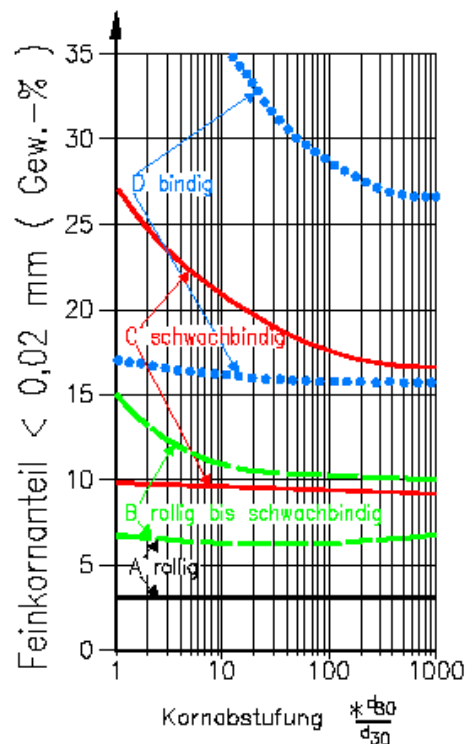


Abb. 4.1: Einteilung der Mischböden nach LEUSSINK et al., 1964 in Abhängigkeit vom Feinkornanteil ($< 0,02 \text{ mm}$) und der Steilheit U^* der Körnungskurve

4.1.3 Feinkörnige Böden

Die Klassifizierung der feinkörnigen Böden erfolgt nach den plastischen Eigenschaften; maßgebende Kriterien für die Plastizität sind der Wassergehalt an der Fließgrenze w_L und die Plastizitätszahl I_P ($I_P = w_L - w_P$ mit $w_P =$ Wassergehalt an der Ausrollgrenze). Grundlage hierfür ist das Plastizitätsdiagramm von CASAGRANDE (Abb. 4.2).

Ein anderes Unterscheidungskriterium stellt der Grad der Bindigkeit dar. Nach STRIEGLER (1969) lassen sich die in Tab. 5.2 dargestellten Bindigkeitsbereiche abgrenzen. Zusätzlich sind Grenzwerte für das Wasserbindevermögen w_b nach ENSLIN/NEFF angegeben.

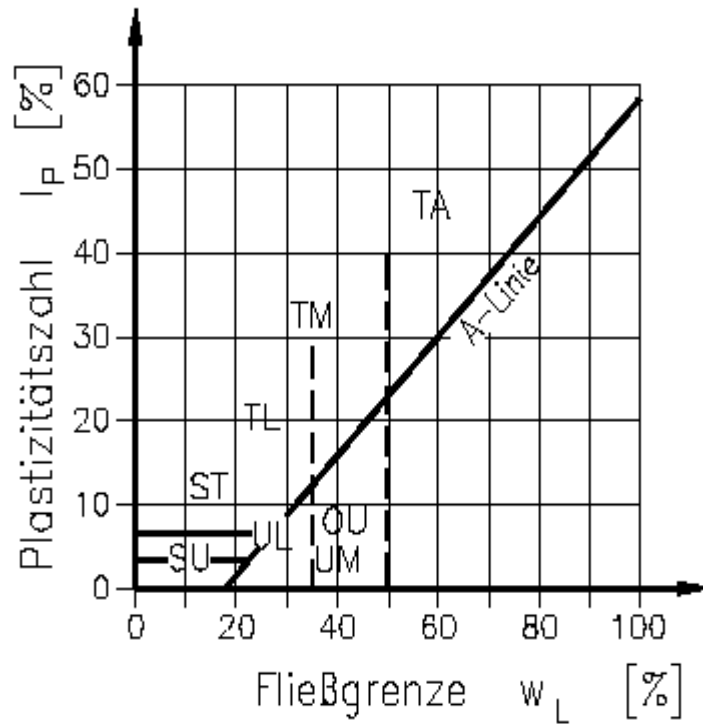


Abb. 4.2: Plastizitätsdiagramm nach CASAGRANDE

Tab. 4.2: Abgrenzung bindiger Erdstoffe nach Bindigkeitsbereichen nach STRIEGLER (1969)

Bindigkeitsbereich	Grenzwassergehalte nach ATTERBERG		Wasserbindevermögen nach NEFF
	Fließgrenze w_L [1]	Ausrollgrenze I_p [1]	w_b [1]
schwach-bindig	< 0,25	< 0,08	$\leq 0,40$
Mittelbindig	0,25 - 0,40	0,08 - 0,20	0,40 - 0,60
Starkbindig	0,40 - 0,55	0,20 - 0,32	0,60 - 0,80
Hochbindig	> 0,55	> 0,32	> 0,80

4.1.4 Organogene und organische Böden

Auch die organogenen Böden und die Böden mit organischen Beimengungen werden, soweit es sich um Schluffe und Tone handelt, nach dem Plastizitätsdiagramm eingeordnet; sie liegen unterhalb der A-Linie nach Abb. 4.2.

4.2 Definition der „Festigkeit“ nichtbindiger Böden

Die "Festigkeit" eines nichtbindigen Bodens kann über die Lagerungsdichte, die Scherfestigkeit und die Zusammendrückbarkeit definiert werden.

4.2.1 Lagerungsdichte

Die Beschaffenheit innerhalb der Klassifikationsgruppen nichtbindiger Böden wird ausschließlich durch die Lagerungsdichte D bzw. die bezogene Lagerungsdichte I_D beeinflusst und wird dadurch qualitativ und quantitativ beurteilbar. Der Verdichtungszustand eines Bodens wird durch die **Lagerungsdichte D**

$$D = \frac{\max n - n}{\max n - \min n} = \frac{\rho_d - \min \rho_d}{\max \rho_d - \min \rho_d}$$

bzw. die **bezogene Lagerungsdichte I_D**

$$I_D = \frac{\max e - e}{\max e - \min e} = \frac{\max \rho_d (\rho_d - \min \rho_d)}{\rho_d (\max \rho_d - \min \rho_d)}$$

ausgedrückt, mit:

n = Porenanteil

$$e = \text{Porenzahl} = \frac{n}{1 - n}$$

Lagerungsdichte D und bezogene Lagerungsdichte I_D werden gekennzeichnet durch folgende Grenzwerte (Tab. 4.3):

Tab. 4.3: Lagerungswerte von Böden

Lagerungsdichte	D	I_D
sehr lockere Lagerung	0 - 0,15	0 - 0,33
lockere Lagerung	0,15 - 0,3	
mitteldichte Lagerung	0,3 - 0,5	0,333 - 0,667
dichte Lagerung	0,5 - 0,75	
sehr dichte Lagerung	> 0,75	0,667 - 1,0

Der Wassergehalt wirkt sich auf die Lagerungsdichte und damit auf die daraus ableitbare Tragfähigkeit und Belastbarkeit nichtbindiger Böden nicht aus.

4.2.2 Scherfestigkeit

Beim Bruch des Bodens, wie Grundbruch, Gelände- und Böschungsbruch, erreichen die Schubspannungen τ aus den äußeren Lasten die Grenze des inneren Widerstandes τ_f des Bodens (s. Abb. 4.3).

Die Spannungen σ und τ , die im Grenzzustand des Bruches in einer Gleitfuge auftreten, werden im τ/σ -Diagramm durch einen Punkt wiedergegeben. Die Wertepaare mehrerer bei verschiedenen Normalspannungen σ abgescherter Probekörper liegen annähernd auf einer Geraden, die durch die Grenzbedingung nach COULOMB beschrieben wird (s. Abb. 4.4):

$$\tau = \tau_f = c + \sigma \cdot \tan \varphi$$

Reibungswinkel φ und Kohäsion c stellen die Scherparameter dar. Bei Kenntnis des Porenwasserdrucks u kann man statt der Druckspannung σ die wirksame Spannung $\sigma' = \sigma - u$ verwenden. Aus der Auftragung der Scherfestigkeit τ_f über σ' erhält man die Gerade:

$$\tau = \tau_f = c' + \sigma' \cdot \tan \varphi'$$

c' stellt die wirksame Kohäsion dar, φ' der wirksame Reibungswinkel. Da der Porenwasserdruck u in Scherversuchen kaum messbar ist, wird die Scherung zur Ermittlung von c' und φ' so langsam ausgeführt, dass der Porenwasserdruck vernachlässigbar ist.

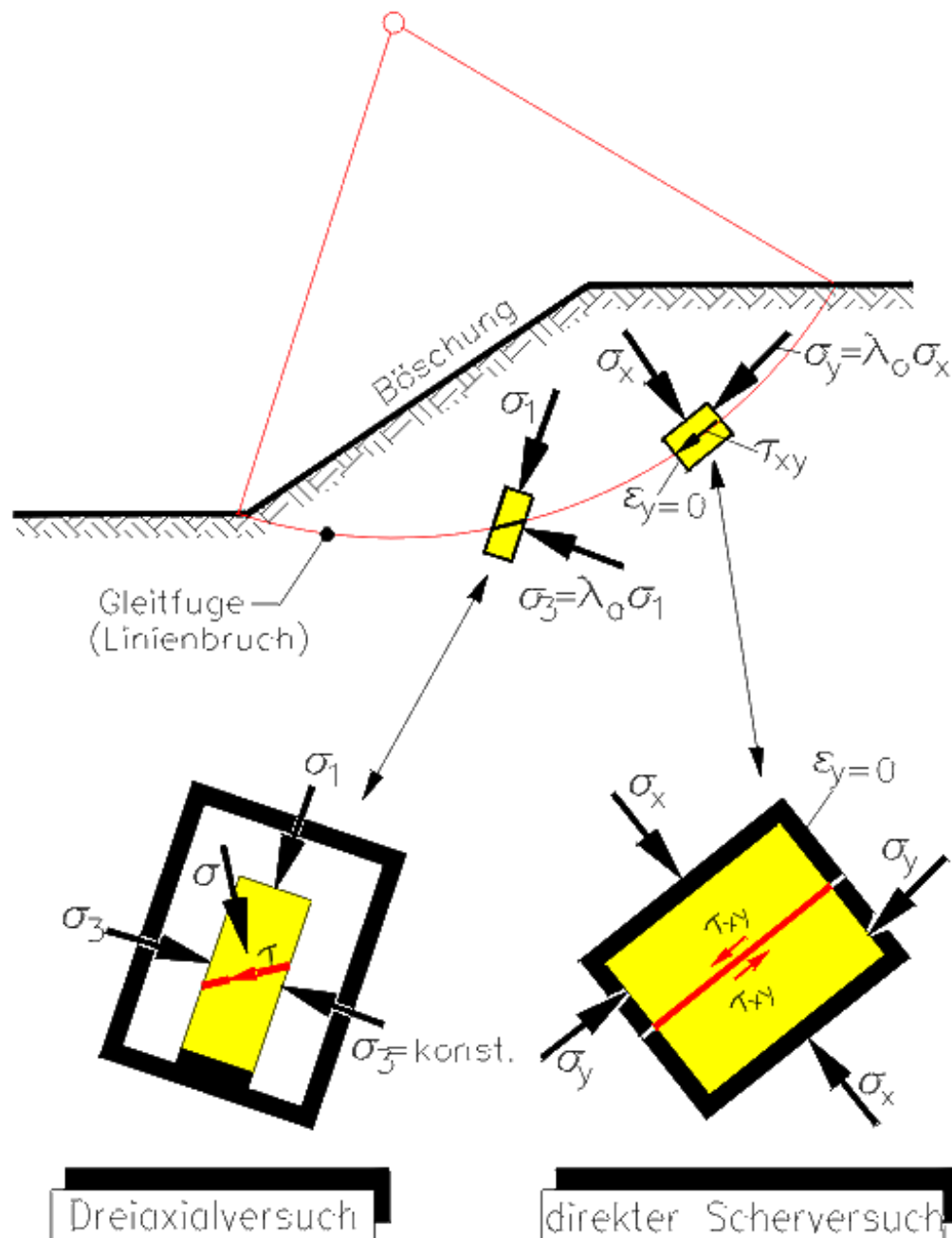


Abb. 4.3: Modellähnlichkeit zwischen Natur und Versuch beim direkten Scherversuch (behinderte Seitendehnung) und Dreiaxialversuch (konstante Seitendruckspannung)

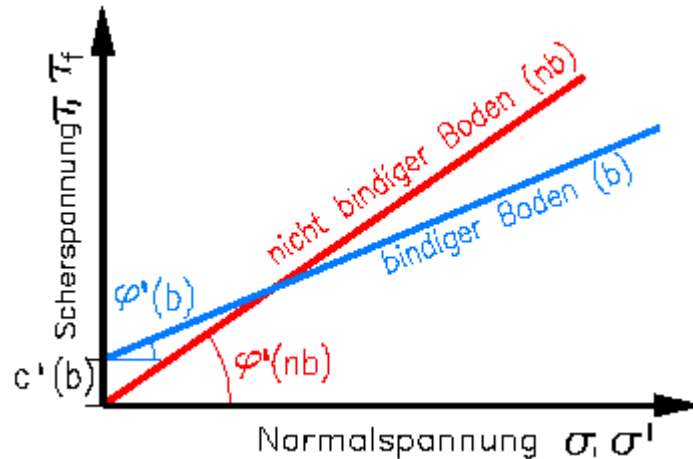


Abb. 4.4: Darstellung des Grenzzustandes im τ/σ -Diagramm

Bei nichtbindigen Böden geht die Schergerade durch den Nullpunkt, d.h. die Kohäsion c' ist gleich 0. Das Scherverhalten kann damit ausschließlich durch den Reibungswinkel φ' beschrieben werden.

4.2.3 Zusammendrückbarkeit

Die Zusammendrückbarkeit ist eine mechanische Eigenschaft eines Erdstoffes und damit indirekt auch ein Indikator für die Festigkeit. Ein Boden ist um so fester, je geringer sich die Zusammendrückung unter einer definierten Belastung einstellt.

Der Zusammenhang zwischen Belastung und Zusammendrückung für nichtbindige Böden wird durch die Steifezahl E_s beschrieben (u.a. GUDEHUS, 1981):

$$E_s = \sigma' (1 + e) / C_c$$

mit: σ' = wirksame Druckspannung [MN/m^2]

e = Porenzahl [1]

C_c = Kompressionsbeiwert [1]

In einer unvorbelasteten Bodenschicht nimmt damit der Steifemodul proportional zur wirksamen Druckspannung und umgekehrt proportional zum Kompressionsbeiwert zu. Kompressionsbeiwerte körniger Erdstoffe sind umso kleiner, je härter die Körner und je größer die Ungleichförmigkeits-

zahl und die Lagerungsdichte sind. In Tab. 4.4 sind Größenordnungen für C_c angegeben. Die angegebenen e_o -Werte gelten für nichtbindige Böden (s.a. Abschn. 4.3.3, Abb. 5.13) und sind nahezu unabhängig von σ_o .

Tab. 4.4: Typische Kompressionsbeiwerte sowie Bezugsporenzahlen bei $\sigma_o = 10 \text{ kN/m}^2$

Erdstoff	C_c [1]	$e \cong e_o$ [1]
Kiessand	0,001	0,3
Feinsand, dicht	0,005	0,5
Feinsand, locker	0,01	0,7

Körnige Böden werden somit durch Druckspannungen allein kaum verdichtet.

4.2.4 Beziehung zwischen Klassifikationsgruppen, Lagerungsdichte und Scherfestigkeit nichtbindiger Böden

Wie bereits ausgeführt, wird bei nichtbindigen Böden die Beschaffenheit - hier Scherfestigkeit und indirekt auch die Tragfähigkeit - maßgebend von der Lagerungsdichte beeinflusst; der Wassergehalt spielt dagegen keine bzw. eine vernachlässigbare Rolle.

Nach Tab. 4.5 können verschiedene bodenphysikalische Kenngrößen abgeschätzt werden. Es handelt sich um Rechenwerte "cal" aus DIN 1055, T 2; ihre Anwendung ist nur unter den in der Norm angegebenen Bedingungen möglich. Die Werte in Spalte 9 wurden vom Verfasser ergänzt. Als wesentlich ist festzuhalten, dass die Festigkeit ausschließlich durch die Lagerungsdichte und den Reibungswinkel ϕ' zu beschreiben ist.

Eine Druckfestigkeit q_u und damit auch ein c_u -Wert lassen sich damit für einen nichtbindigen Boden oder einen damit vergleichbaren Abfall/Reststoff nicht angeben. Die entsprechenden Vorgaben der AbfAbIV und der TA Abfall sind damit auf nichtbindige Materialien nicht anwendbar. Entsprechende Untersuchungen an Abfällen, die bodenphysikalisch mit nichtbindigen Erdstoffen vergleichbar sind (z.B. Gießereisande), sind somit nicht zu begründen.

4.3 Definition der „Festigkeit“ bindiger Böden

4.3.1 Zustands- oder Konsistenzzahl I_C

Die Beschaffenheit bindiger Böden (feinkörnige Böden und ein Teil der gemischtkörnigen Böden) wird ganz dominant durch den Wassergehalt gesteuert.

Die Verformbarkeit (Konsistenz) eines bindigen Bodens wird mit abnehmendem Wassergehalt geringer, seine Festigkeit größer.

Mit Hilfe von Fließgrenze w_L und Ausrollgrenze w_p und Kenntnis des natürlichen Wassergehaltes w läßt sich eine eindeutige Aussage über den Zustand eines bindigen Bodens machen. Dazu dient die Zustands- oder Konsistenzzahl I_C :

$$I_C = \frac{w_L - w}{w_L - w_p} = \frac{w_L - w}{I_p}$$

Fließ- und Ausrollgrenze werden nach DIN 18 121, T 1 bestimmt, der natürliche Wassergehalt nach DIN 18 121.

Tab. 4.5: Bodenkenngrößen für nichtbindige Böden (aus DIN 1055, T. 2)

Spalte	1	2	3	4	5	6	7	8
Zeile	Bodenart	Kurzzeichen nach DIN 18 196	Lagerung ¹⁾	Wichte			Reibungswinkel cal φ'	Steifezahl E_s
				erdfeucht	wassergesättigt	unter Auftrieb		
				cal γ_r	cal γ_r	cal γ'		
				kN/m ³	kN/m ³	kN/m ³	Grad	MN/m ²
1	Sand, schwach	SE	locker	17,0	19,0	9,0	30	30
2	schluffiger Sand	sowie SU	mitteldicht	18,0	20,0	10,0	32,5	60
3	Kies-Sand, eng gestuft	mit $U \leq 6$	dicht	19,0	21,0	11,0	35	120
4	Kies, Geröll	GE	locker	17,0	19,0	9,0	32,5	50
5	Steine mit		mitteldicht	18,0	20,0	10,0	35	100
6	geringem Sandanteil, eng gestuft		dicht	19,0	21,0	11,0	37,5	200
7	Sand, Kies-Sand	SW, SI, SU	locker	18,0	20,0	10,0	30	30
8	Kies, weit oder	GW, GI mit	mitteldicht	19,0	21,0	11,0	32,5	60
9	intermittierend gestuft	$6 < U \leq 15$	dicht	20,0	22,0	12,0	35	100
10	Sand, Kies, Sand,	SI, SI, SU	locker	18,0	20,0	10,0	30	50
11	Kies, schwach	GW, GI	mitteldicht	20,0	22,0	12,0	32,5	80
12	schluffiger Kies, weit oder intermittierend gestuft	mit $U > 15$ sowie GU	dicht	22,0	24,0	14,0	35	120

¹⁾ locker: $0,15 < D \leq 0,30$, mitteldicht: $0,30 < D \leq 0,50$; dicht: $0,50 < D \leq 0,75$; Lagerungsdichte s. Abschn. 4.2.1

Zahlenwerte gültig für:

- gewachsene und geschüttete Böden; ausgenommen Böden mit porösem Korn, z.B. Bimskies, Tuffsand
- Zeilen 1 bis 9 für runde und abgerundete Kornform; für kantige Kornform darf der Reibungswinkel um $2,5^\circ$ erhöht werden.

Tab. 4.6: Grenzwassergehalte der wichtigsten Lockergesteine

Lockergestein	Bezeichnung	Beispiel			Grenzen von $I_p \approx$
		Fließ- grenze	Ausroll- grenze	Plastizität	
		w_L [1]	w_P [1]	I_p [1]	
Sand	unplastisch	0,20	0,20	0	0
Schluff, Löß	schwach plas- tisch	0,25	0,20	0,05	0,02..0,10
Lehm, magerer Ton	gut plastisch	0,40	0,25	0,15	0,10..0,25
fetter Ton	hochplastisch	0,80	0,30	0,50	0,25..0,75
organische Erd- stoffe	z.T. plastisch	2,5	1,5	1,0	-
Bentonit	-	4,0	0,8	3,2	-

Für die Konsistenzzahl I_C als indirekter Festigkeitsparameter wird folgende Einteilung verwendet:

- flüssig $I_C \leq 0$
- breiig $0 \leq I_C < 0,5$
- weich $0,5 \leq I_C < 0,75$
- steif $0,75 \leq I_C < 1,0$
- halbfest $1,0 \leq I_C \leq (w_L - w_S) / I_p$
- fest $I_C > (w_L - w_S) / I_p$

w_S = Wassergehalt an der Schrumpfgrenze

Die Zustandsform (Konsistenz) eines bindigen Bodens oder vergleichbarer Abfälle in Abhängigkeit vom Wassergehalt lässt sich im Knetversuch qualitativ folgendermaßen ermitteln (DIN 4021, T 1):

- **breiig:** der Boden quillt beim Pressen in der Faust zwischen den Fingern durch,
- **weichplastisch:** der Boden lässt sich leicht kneten,

- **steifplastisch:** der Boden lässt sich schwer kneten, aber in der Hand noch ohne zu zerbröckeln in 3 mm dicke Röllchen ausrollen,
- **halbfest:** der Boden zerbröckelt beim Ausrollen, er ist aber noch zu feucht genug, um ihn erneut zu einem Klumpen formen zu können,
- **fest:** der Boden ist ausgetrocknet, lässt sich nicht mehr kneten, nur noch brechen.

4.3.2 Scherfestigkeit

Bei bindigen Böden mit schneller Belastung (relativ zu den Entwässerungsmöglichkeiten) ist anfangs das Porenwasser gespannt und nur ein Teil der Belastung wird vom Korn - zu - Korndruck getragen. Mit der Zeit übernimmt der Korndruck (wirksamer Spannungsanteil σ') zunehmend die Last und der Porenwasserdruck wird durch die Entwässerung ($= f(k, E_s, t)$) abgebaut.

Diesem Konsolidationsvorgang (= Auspressen von Porenwasser) ist bei der Ermittlung der Scherfestigkeit Rechnung zu tragen und deshalb zu unterscheiden zwischen dem **Anfangs-** und **Endzustand** (Abb. 4.5).

4.3.2.1 Anfangszustand für unvorbelastete bindige Erdstoffe (c_u, φ_u)

Ein bindiger Erdstoff gilt als unvorbelastet (GUDEHUS, 1981) oder normalkonsolidiert, wenn eine äquivalente Spannung σ_e ($\sigma_e = \sigma_o \exp.(e_o - e)/C_c$) gleich der wirksamen (vertikalen) Spannung σ' ist. Eine gestörte, anfänglich sehr weiche Probe erreicht diesen Zustand, wenn man ihre Zusammendrückung unter konstanter Druckspannung σ abwartet. Dieselbe Probe wird anschließend unter einer Normalspannung $\sigma \geq \sigma_e$ abgeschert. Die Schubspannung nimmt, wie in Abb. 4.6 dargestellt ist, mit der Scherung zu. Der Erdstoff reagiert also plastisch.

Bei Auftragung der Scherfestigkeit τ_f über σ gemäß Abb. 4.7 ergibt sich eine horizontale Gerade. Der Erdstoff ist reibungsfrei. Für die Scherfestigkeit gilt:

$$\tau = \tau_f = c_u \quad \text{mit:}$$

$$c_u = \text{undrÄnierte KohÄsion [kN/m}^2\text{]} \text{ und } \varphi_u = 0.$$

Alternativ zu Abb. 4.7 können für den Grenzzustand auch die Hauptspannungen σ_1 und σ_3 , die im Probekörper wirken, im τ/σ -Diagramm wiedergegeben werden. Die Umhüllende der Grenzspannungskreise von Probekörpern, die bei verschiedenen Spannungen σ_3 abgeschert werden, wird durch die MOHR'sche Grenzbedingung beschrieben (Abb. 4.8). Die Umhüllende wird durch eine Gerade angenähert. Einen Sonderfall der MOHR'schen Grenzbedingung stellt der 1-axiale Druckversuch (s.a. Abschn. 5.1.2) dar, für ihn gilt: Seitendruck $\sigma_3 = 0$.

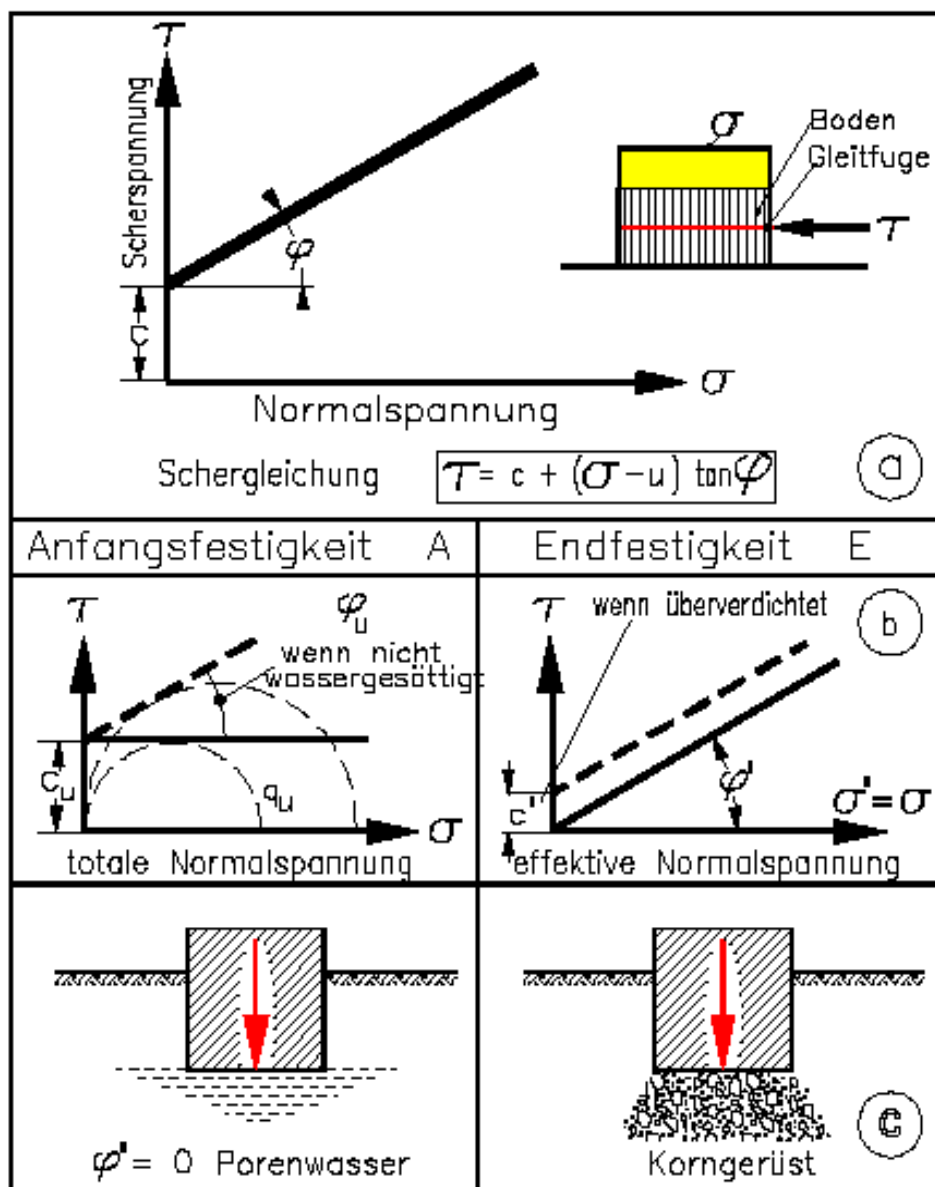


Abb. 4.5: Grenzzustände der Scherfestigkeit

- a) Scherversuch
- b) Scherdiagramm
- c) Aufnahme der Bauwerkslast bzw. Auflastspannung aus Schüttungen

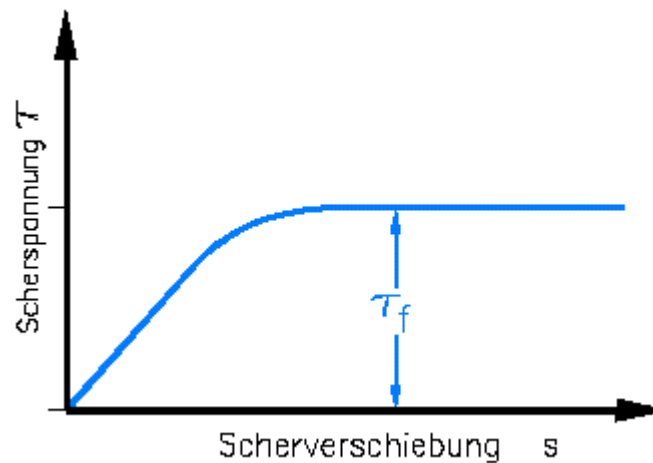


Abb. 4.6: Schubspannungen bei einfacher Scherung ohne Volumenvergrößerung unter konstanter Normalspannung

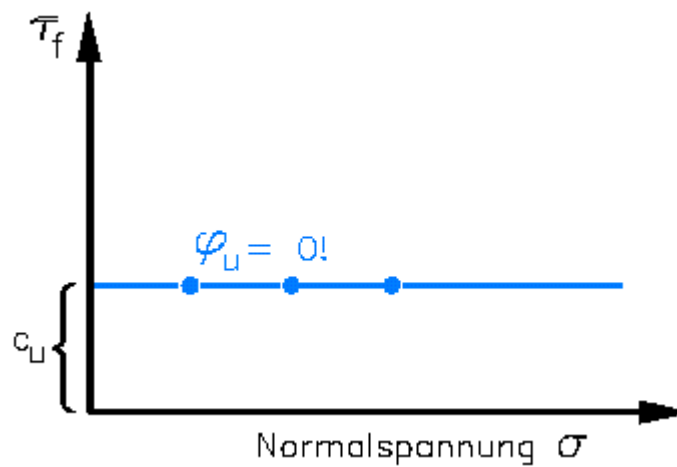


Abb. 4.7: Grenzzustände bei undrännierter Scherung eines gesättigten bindigen Bodens

Die Bruchspannung $\sigma_{1\max}$ entspricht der 1-axialen Druckfestigkeit q_u .

Hieraus folgt für undrännierte, wassergesättigte Bedingungen ($\varphi_u = 0$):

$$c_u = 0,5 \cdot \max(\sigma_1 - \sigma_3) \text{ bzw.}$$

$$c_u = 0,5 \cdot q_u$$

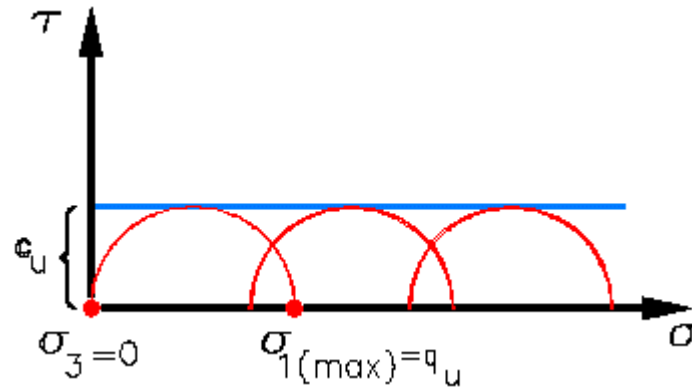


Abb. 4.8: Grenzzustände bei Rechteckverformung eines gesättigten bindigen Erdstoffes

4.3.2.1.1 Einfluss des Wassergehaltes auf die nichtentwässerte Kohäsion c_u

Wenn man undrained Scherversuche an Proben mit verschiedenen äquivalenten Spannungen σ_e ausführt, zeigt sich, dass c_u proportional zu σ_e ist (HVORSLEV, 1960).

Sei c_{u0} die undrained Kohäsion bei der äquivalenten Spannung $\sigma_e = \sigma_0$ (z.B. $\sigma_0 = 10 \text{ kN/m}^2$). Proportionalität von σ_e und c_u vorausgesetzt, folgt mit diesen Größen:

$$c_u/c_{u0} = \sigma_e/\sigma_0$$

oder mit:

$$\text{Porenzahl } e = w \cdot \rho_s/\rho_w$$

(ρ_s = Reindichte des Bodens, ρ_w = Dichte des Wassers, w = Wassergehalt).

$$\sigma_e = \sigma_{0 \text{ exp.}} \cdot \frac{e_0 - e}{C_c} = \sigma_{0 \text{ exp.}} \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \frac{w_0 - w}{C_c} \right)$$

bzw.

$$c_u = C_{u0 \text{ exp.}} \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \frac{w_0 - w}{C_c} \right)$$

wobei w_0 den Wassergehalt bei $\sigma_e = \sigma_0$ bezeichnet. C_c ist der Kompressionsbeiwert nach Abschn. 4.2.3.

Die undrainede Kohäsion c_u ist damit keine Materialkonstante, sondern sie hängt exponentiell vom Wassergehalt w ab. Je geringer der Kompressionsbeiwert C_c eines bindigen Bodens ist (s. Tab. 4.7) desto stärker ändert sich c_u mit w . Man erkennt aus vorstehender Gleichung, dass schon geringe Veränderungen von C_c und w zu großen Streuungen bei der Zielgröße c_u führen können.

Tab. 4.7: Undrainede Kohäsion c_{u0} und zugehöriger Wassergehalt w_0 bei $\sigma_0 = 10 \text{ kN/m}^2$ sowie Kompressionsbeiwerte C_c und Zähigkeitsindices $I_{v\alpha}$ (typische Werte)

Erdstoff	c_{u0} kN/m ²	w_0 [1]	C_c [1]	$I_{v\alpha}$ [1]
toniger Schluff	7	0,4	0,2	0,01
schluffiger Ton	5	0,5	0,03-0,6	0,02
Rohton	4	0,7	0,1	0,03
Bentonit	2	1,8	0,5	0,06
Klei	3-6	0,7-0,9	0,1-0,3	0,04
Torf	n.b.		1	0,07

Praktische Beispiele für diese Abhängigkeit zeigt Abb. 4.9 (BEHRENS, 1995), die experimentell mit der Flügelsonde ermittelt wurden (s. auch Abb. 5.9).

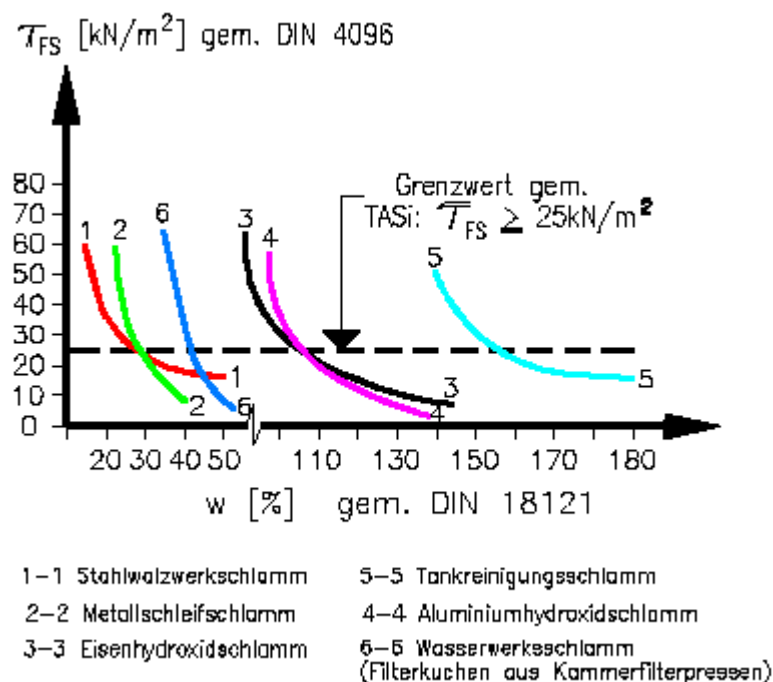


Abb. 4.9: Abhängigkeit der Flügelscherfestigkeit τ_{FS} vom Wassergehalt w für unterschiedliche Schlämme (nach BEHRENS, 1995)

4.3.2.1.2 Einfluss der Schergeschwindigkeit auf die nicht entwässerte Kohäsion c_u

Der Einfluß der Schergeschwindigkeit auf die undrainede Kohäsion wassergesättigter, feinkörniger Böden ist bereits sehr früh von zahlreichen Geotechnikern untersucht worden (z.B. CAD-LING/OSTENSTAD (1950), BRINCH-HANSEN/LUNDGREN (1960), BJERRUM (1972, 1973), PERLOW/RICHARDS (1977), TORSTENSSON (1977)). LEINENKUGEL (1978) hat in Biaxialversuchen die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ stufenweise erhöht oder vermindert. Dabei nahm τ jeweils um denselben Betrag $\Delta\tau$ zu oder ab (Abb. 4.10).

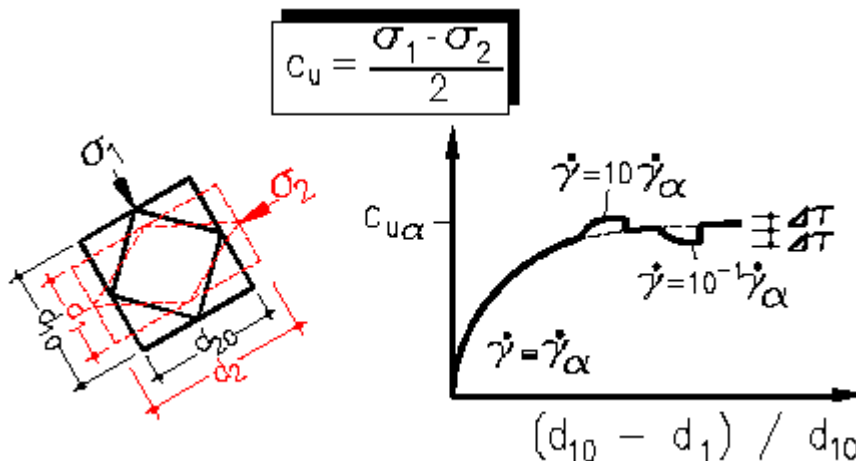


Abb. 4.10: Hauptspannungsdifferenz bei einem Biaxialversuch an gesättigtem Ton mit verschiedenen Schergeschwindigkeiten

$c_{u\alpha}$ ist die undrainede Kohäsion bei einer Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}_\alpha$.

Bei einer anderen Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ (z.B. $10 \cdot \dot{\gamma}_\alpha$ und $1/10 \cdot \dot{\gamma}_\alpha$) ergibt sich die undrainede Kohäsion:

$$c_u = c_{u\alpha} [1 + I_{v\alpha} \cdot \ln(\dot{\gamma} / \dot{\gamma}_\alpha)]$$

In diesem logarithmischen Zähigkeitsgesetz bezeichnet $I_{v\alpha}$ den sog. **Zähigkeitsindex**. Für eine zu vereinbarende Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}_\alpha$ ist $I_{v\alpha}$ eine Bodenkonstante. Typische Werte zeigt Tab. 4.7. Zwischen $I_{v\alpha}$ und der Fließgrenze w_L deutet sich eine positive Korrelation an. Mit steigender Fließgrenze w_L nimmt auch $I_{v\alpha}$ zu. Die Ergebnisse zeigen, dass dieser Einfluss gerade bei ausgeprägt plastischen Böden nicht vernachlässigbar ist.

Laborversuche zur Ermittlung von c_u werden meist mit einer Schergeschwindigkeit in der Größenordnung $\dot{\gamma}_\alpha = 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$ ausgeführt. Grenzzustände im Baugrund weisen dagegen oft um 2 - 4 Zehnerpotenzen geringere Schergeschwindigkeiten auf. Mit den $I_{v\alpha}$ -Werten nach Tab. 4.7 ergeben sich damit Reduktionen um den Faktor 0,98 bzw. 0,35.

Zur Ermittlung der undränierten Kohäsion c_u wird häufig die Feld- oder Laborflügelsonde eingesetzt (s.a. Abschn. 5.1.3). Die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}_\alpha$ liegt etwa in der Größenordnung der Drehzahl ω_0 des Flügels. Damit ist die Kohäsion c_u etwa mit dem Faktor $(1 + I_{v\alpha} \cdot \ln(\dot{\gamma}/\omega_0))$ zu reduzieren, wobei sich der Zähigkeitsindex auf die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}_0 = \omega_0$ bezieht.

BJERRUM (1972) schlägt einen annähernd gleich großen Reduktionsfaktor in Abhängigkeit von der Plastizitätszahl I_p vor (Abb. 4.11). Die Herleitung erfolgt jedoch nicht experimentell sondern durch Nachrechnung von beobachteten Instabilitäten in Tonen (s. Erläut. in Abschn. 5.1.3.1).

Da ω_0 meist in der Größenordnung von 10^{-2} m/s liegt, ergibt sich bei den praktisch vorkommenden Schergeschwindigkeiten eine erhebliche Reduktion. VON BLOH/BLÜMEL (1992) kommen auf der Grundlage von Laboruntersuchungen an Schlämmen zu ähnlichen Ergebnissen. Eine Erhöhung der Flügel-Drehgeschwindigkeit um den Faktor 10 führt zu einem Anstieg des Flügelscherwiderstandes zwischen 15 bis 25 %, wobei sich die größeren Werte für die größeren Drehgeschwindigkeiten ω_1 ergeben. Ein Teil der Festigkeit wird mit der Zeit wieder zurückgewonnen (Thixotropie), erreicht jedoch i.d.R. den Ausgangswert nicht mehr.

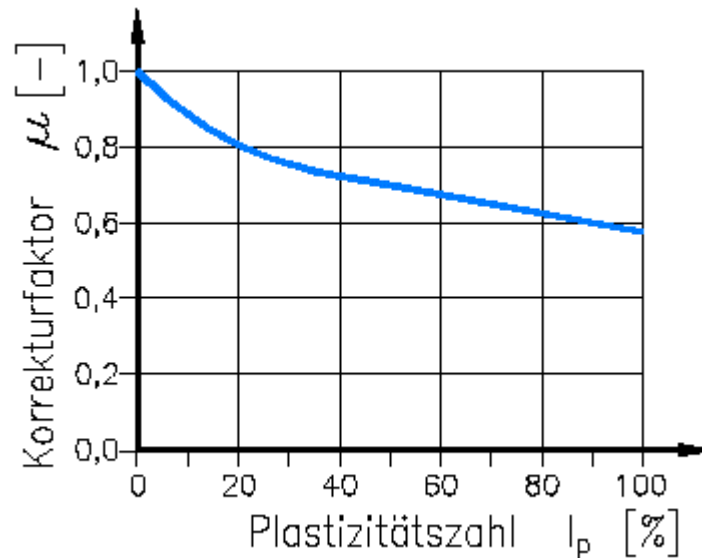


Abb. 4.11: Korrekturfaktor μ in Abhängigkeit von der Plastizitätszahl nach BJERRUM (1972)

4.3.2.1.3 Sensitivität und Thixotropie

Bei mechanischer Bearbeitung (z.B. Kneten) erfahren bindige Erdstoffe eine mehr oder weniger starke Verminderung der undränierten Kohäsion. Der Grund hierfür ist nach BRINCH HANSEN/LUNDGREN (1960) in der Tonstruktur zu suchen. Die mechanische Bearbeitung zerstört die regelmäßige Anordnung der Moleküle in den Adsorptionshüllen und damit die Struktur des Tons.

Ein Teil der Festigkeit wird mit der Zeit wieder zurückgewonnen (Thixotropie), die Festigkeitsabnahme aber, die infolge Strukturveränderung eintritt, wird nicht wieder ganz aufgehoben. Diese Empfindlichkeit (Sensitivität) wird als das Verhältnis :

$$S_t = \frac{c_u \text{ ungestört}}{c_u \text{ gestört}} [1]$$

zwischen den undränierten Scherfestigkeiten oder einaxialen Druckfestigkeiten q_u definiert.

Wenn $S_t = 1 - 2$ ist, handelt es sich um eine geringe Empfindlichkeit, zwischen 2 und 4 um mittlere und von 4 - 8 um hohe Empfindlichkeit. Ist $S_t > 8$, spricht man von Quickton. Bei "normalen" Ton-

arten ist die Empfindlichkeit bei der Fließgrenze nur gering. Nimmt der Wassergehalt ab und die Konsistenz zu, wächst die Empfindlichkeit bis zu einem gewissen Wert, um dann wieder abzunehmen, so dass bei der Ausrollgrenze S_t etwa = 1,0 ist. Bei rissigem Material kann S_t sogar etwas unter 1,0 liegen, da der feinkörnige Boden beim Kneten wieder homogen werden kann.

Bei nicht wassergesättigten bindigen Böden ($S_r < 1$), wie sie sich z.B. beim Komprimieren einer Aufschüttung in Deponien befinden, wird eine Vergrößerung des äußeren Drucks σ ein Zusammendrücken von Poren und Luftbläschen hervorrufen, d.h. die Porenziffer verringert sich ohne dass der Wassergehalt verändert wird. Die geringere Porenziffer bedeutet eine Erhöhung der echten Kohäsion und gleichzeitig ein Anwachsen der wirksamen Spannungen. Aus weiteren Gesetzmäßigkeiten folgt, dass die undrained Scherfestigkeit c_u normalverdichteter bindiger Böden proportional zur wirksamen Belastung σ ist. Es gilt:

$$c_u = K \cdot \sigma \quad \text{mit:}$$

$$c_u = \text{ undrained Scherfestigkeit von normalverdichtetem Boden [kN/m}^2\text{]}$$

$$K = \text{ dimensionsloser Beiwert, abhängig von der Bodenart.}$$

Für marine, anorganische Tone ergibt sich nach BJERRUM (1954) ein signifikanter Zusammenhang zwischen κ und der Plastizitätszahl I_p (Abb. 4.12).

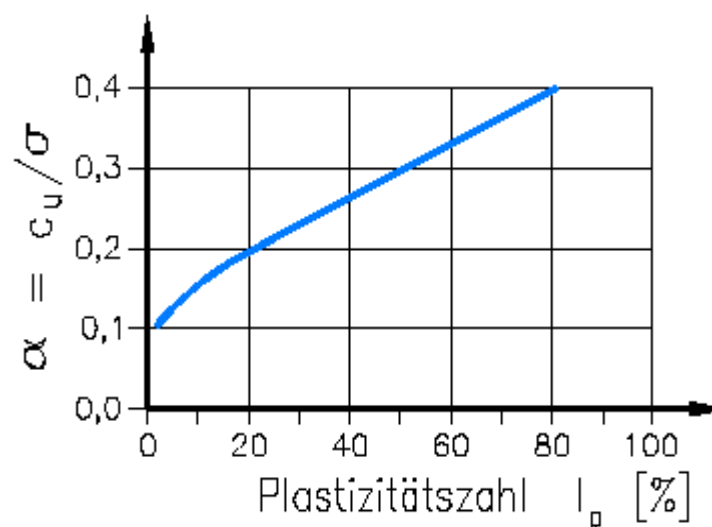


Abb. 4.12: Beziehung zwischen κ und I_p nach BJERRUM (1954)

4.3.2.2 Endzustand für entwässerte Bedingungen (φ' , c')

Nach Konsolidierung des Erdstoffes unter Belastung ist das Porenwasser entspannt ($\Delta u = 0$) und der Korn-zu-Korn-Druck nimmt die äußere Belastung auf. Im **Bruchgrenzfall** erreichen die wirksamen Schubspannungen τ die Festigkeitsgrenze τ_f mit voller Aktivierung von Reibung und Kohäsion zwischen den Bodenteilchen. Es gilt (s.a. Abschn. 4.2.2):

$$\Delta u = 0$$

$$\tau_f = c' + \sigma' \cdot \tan \varphi'$$

$$\sigma = \sigma'$$

4.3.3 Zusammendrückbarkeit

Die in Abschn. 4.2.3 entwickelte Beziehung für den Steifemodul hat auch für bindige Böden Gültigkeit. Während jedoch nichtbindige, körnige Böden durch Druckspannungen kaum verdichtet werden, verhalten sich feinkörnige und organische Böden wesentlich anders. Vor dem Einbau kann man dem Erdstoff beliebig viel Wasser beimischen und so irgendeine Konsistenzzahl erreichen. Durch den Einbau ändert sich I_C nicht. Ein typisches Bild zeigt Abb. 4.13a. Zum Vergleich ist in Abb. 4.13 b das Verhalten eines rolligen Bodens dargestellt (GUDEHUS, 1981).

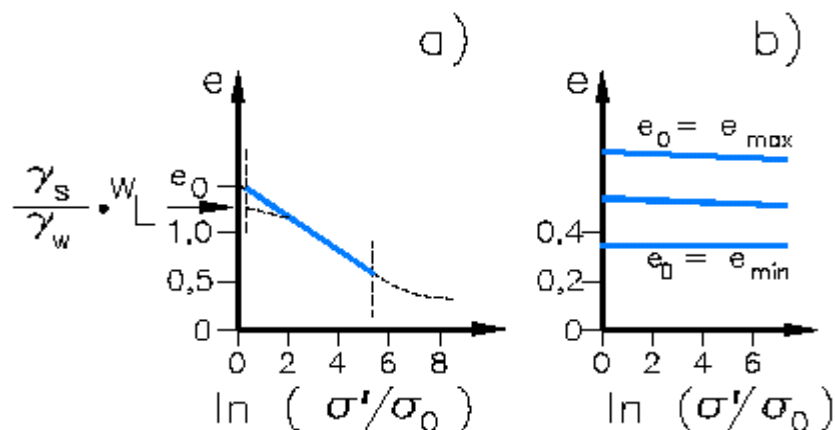


Abb. 4.13:a) Starke Verringerung der Porenzahl e eines bindigen Erdstoffes mit zunehmender wirksamer Spannung σ'

b) Sehr schwache Verringerung der Porenzahl e eines körnigen Erdstoffes mit zunehmender wirksamer Spannung σ'

Wird der Boden z.B. mit dem Wassergehalt an der Fließgrenze w_L eingebaut, erfolgt die Zusammendrückung zunächst recht unregelmäßig. Bei höheren Drücken folgt die Zusammendrückung der ausgezogenen Geraden. Es gilt:

$$e = e_0 - C_c \ln(\sigma'/\sigma_0)$$

Bei einem anderen Einbauwassergehalt wird dieselbe Kennlinie erreicht und zwar umso eher je größer w anfangs war. Typische C_c - und e_0 -Werte zeigt Tab. 4.8.

Tab. 4.8: Typische C_c - und e_0 -Werte

Erdstoff	C_c [1]	e_0 [1]
Grobschluff	0,02	0,8
toniger Schluff	0,03 - 0,6	0,9 - 1,2
Kaolin Ton	0,1	1,5
Klei	0,1 - 0,3	1,2 - 2,5
Smectit Ton	0,5	5
Torf	1,0	10

Bindige Erdstoffe haben danach um Zehnerpotenzen größere C_c -Werte und entsprechend kleinere E_s -Werte. Bindige Erdstoffe können Strukturen von sehr verschiedener Dichte aufweisen. Daraus folgt, dass die Zusammendrückung mit der Dicke der diffusen Wasserhüllen zunimmt. Daher ist C_c mit den Indexgrößen w_L und I_p positiv korrelierbar (SKEMPTON, 1948; WROTH/WOOD 1978; LO/LOVELL 1983).

4.3.4 Beziehungen zwischen Klassifizierungsgruppen, Konsistenz und nichtentwässerter Kohäsion c_u bzw. 1-axialer Druckfestigkeit q_u

Quantitative Beziehungen zwischen der Konsistenzzahl I_C und der einaxialen Druckfestigkeit q_u werden von ZWECK (1969) mitgeteilt. Sie gehen auf TERZAGHI und PECK (1961) zurück (Tab. 4.9). Die Mindestwerte der AbfAbIV und der TA Abfall charakterisieren danach den Übergang von der weichen zur steifen Zustandsform.

Tab. 4.9: Beziehungen zwischen Konsistenz I_C und 1-axialer Druckfestigkeit q_u (c_u)

Zustandsform	I_C [1]	q_u [kN/m ²]	c_u [kN/m ²]
breiig	< 0,5	< 25	< 12,5
weich	0,5 - 0,75	25 - 50	12,5 - 25
steif	> 0,75 - 1,0	50 - 200	25 - 100
halbfest	> 1,0	200 - 400	100 - 200
fest	s. Abschn. 4.3.1	> 400	> 200

In Tab. 4.10 können für bindige und organische Böden in Abhängigkeit von der Zustandsform für Anfangs- und Endzustand Kenngrößen abgeschätzt werden. Es handelt sich um Rechenwerte ("cal") nach DIN 1055, T 2, die bereits abgemindert sind. Die Spalte 9 wurde nach Erfahrungswerten ergänzt.

Als wesentlich ist festzuhalten, dass nach den vorliegenden Zuordnungswerten die Zuordnungswerte der AbfAbIV und der TA Abfall nur eingehalten werden können, wenn ein abzulagernder feinkörniger Boden oder vergleichbarer Abfall mindestens in der steifen Zustandsform vorliegt. Nach Abschn. 4.3.1 ist ein Erdstoff (bildlich) steifplastisch, wenn er sich nur schwer kneten lässt, aber in der Hand noch ohne zu zerbröckeln in 3 mm dicke Röllchen ausformen lässt.

Tab. 4.10: Bodenkenngrößen für bindige Böden und organische Böden (aus DIN 1055, T.2)

Spalte	1	2	3	4	5	6	7	8	9 ^{*)}
Zeile	Bodenart	Kurzzeichen nach DIN 18 196	Zustandsform ¹⁾	Wichte		Reibungswinkel	Kohäsion		Steifemodul
				über Wasser	unter Wasser				
				cal γ	cal γ	cal ϕ'	cal c	cal c_u	E_s
				kN/m ³	kN/m ³	Grad	kN/m ²	kN/m ²	MN/m ²
1	Anorganische bindige Böden mit ausgeprägt plastischen Eigenschaften ($w_L > 50\%$)	TA	weich	18,0	8,0	17,5	0	15	2
2			steif	19,0	9,0	17,5	10	35	3
3			halfest	20,0	10,0	17,5	25	75	5
4	Anorganische bindige Böden mit mittelplastischen Eigenschaften ($50\% \geq w_L \geq 35\%$)	TM und UM	weich	19,0	9,0	22,5	0	5	4
5			steif	19,5	9,5	22,5	5	25	6
6			halfest	20,5	10,5	22,5	10	60	10
7	Anorganische bindige Böden mit leicht plastischen Eigenschaften ($w_L < 35\%$)	TL und UL	weich	20,0	10,0	27,5	0	0	5
8			steif	20,5	10,5	27,5	2	15	10
9			halfest	21,0	11,0	27,5	5	40	15
10	Organischer Ton, organischer Schluff	OT und OU	weich	14,0	4,0	15	0	10	1
11			steif	17,0	7,0	15	0	20	3
12	Torf ohne Vorbelastung	HN und		11,0	1,0	15	2	10	0,4 - 1
13	Torf unter mäßiger Vorbelastung	HZ		13,0	3,0	15	5	20	0,8 - 2

1) weich: $0,50 < I_C \leq 0,75$, steif: $0,75 < I_C \leq 1,00$; halfest: $I_C > 1,00$

*) vom Verfasser ergänzt

4.3.5 Bedeutung der Grenzzustände für Deponiebetrieb und -entwurf

Grenzzustände von Erd- oder Deponiekörpern berechnet man mit Hilfe der undränierten Kohäsion c_u (und mit $\varphi_u = 0$), wenn die Verformungen annähernd volumenänderungsfrei sind. Dies ist insitu gleich nach der Lastaufbringung der Fall, wenn die für den Ausgleich des Porenwasserdrucks erforderliche Zeit erheblich größer ist als die seit der Lastaufbringung verstrichene Zeit. Man spricht dann vom **Anfangsgrenzzustand** (s.a. Abb. 4.4). Voraussetzung ist, dass an jeder Stelle $\sigma \geq \sigma_e$ (bei Scherung) gilt. Dieser Zustand kann näherungsweise auch noch bis zu einem Sättigungsgrad $S_r = 0,95$ angesetzt werden. Wenn die Verformungen dagegen sehr langsam ablaufen, können sich in situ die Porenwasserdrücke nahezu vollständig ausgleichen. Bei genügend großen Scherverformungen kann der Erdkörper in den sog. **Endgrenzzustand** gelangen. Bei unveränderten Lasten sind Endgrenzzustände unvorbelasteter feinkörniger Böden weniger wahrscheinlich als Anfangszustände. Endgrenzzustände sind insoweit für den Entwurf i.d.R. nicht maßgebend. Dieser Nachweis ist aber im Einzelfall jeweils zu führen.

Für den Zeitpunkt des Materialeinbaus gilt ausschließlich der Anfangsgrenzzustand mit dem Parameter c_u , der jedoch - wie bereits aufgeführt - nur auf wassergesättigte feinkörnige, d.h. bindige Erdstoffe und Abfälle anzuwenden ist. Für rollige, nicht bindige Böden lässt sich der Anfangsgrenzzustand nicht definieren, damit entfällt auch die gesonderte Ermittlung von c_u bzw. q_u .

5 Versuchstechnische Grundlagen

5.1 Vorbemerkungen

Die nicht entwässerte Kohäsion wird direkt im dreiaxialen Scherversuch (DIN 18137, T1 und T2), im einaxialen Druckversuch (DIN 18136, 3/87) oder mit der Flügelsonde (DIN 4096, 5/80) bestimmt. letztgenannte DIN gilt für Sondierungen im Gelände (Feldflügelsonde), wird aber sinngemäß in der bodenmechanischen Versuchspraxis auf die Laborflügelsonde angewendet.

5.1.1 Dreiaxialer Scherversuch (DIN 18 137)

Der unkonsolidierte, undrained Versuch (auch UU-Versuch) ist ein Scherversuch an undrained bindigen Probekörpern, deren Wassergehalt gleich dem Wassergehalt im Baugrund sein soll. Die Probekörper werden bei geschlossenem Porenwassersystem auf verschiedene Anfangsdrücke σ_3 belastet und dann bei ebenfalls geschlossenem Porenwassersystem abgeschert. Der Porenwasserdruck wird nicht gemessen. Der Versuch ergibt die totalen Spannungen in einem Grenzzustand mit konstantem Wassergehalt (Abb. 5.1).

UU-Versuche können mit Triaxialzellen und Biaxialgeräten durchgeführt werden. Ein Sonderfall des UU-Versuches sind einaxiale Druckversuche und Flügelsondierungen. Letztere Versuche liefern nur einen Punkt der Grenzbedingung, sind damit hinsichtlich der Zielgröße c_u mit größerer Unsicherheit behaftet.

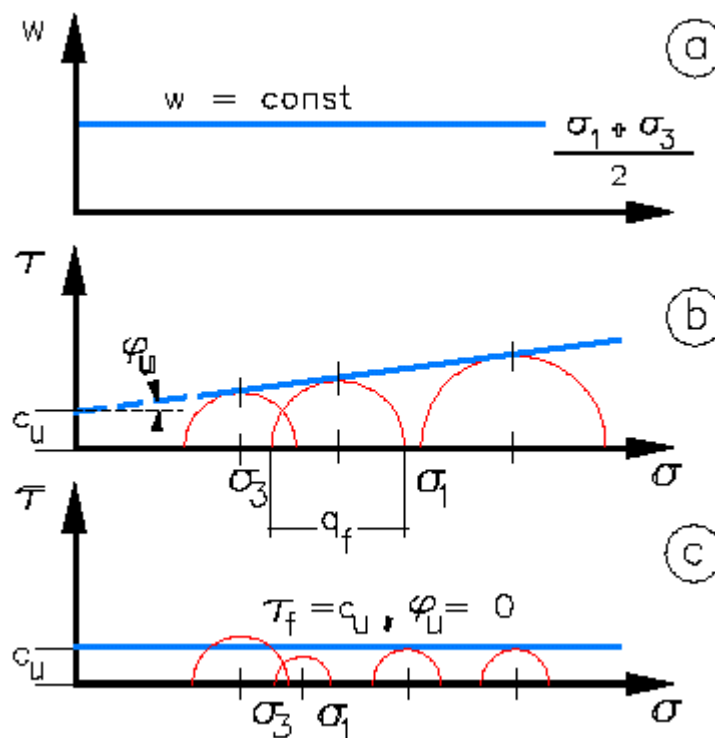


Abb. 5.1: Scherparameter c_u und φ_u

- Wassergehalt in Abhängigkeit von $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ beim Abscheren
- totale Grenzbedingung und Scherparameter φ_u und c_u für einen teilgesättigten ($S_r < 1$) bindigen Boden
- totale Grenzbedingung für einen wassergesättigten ($S_r = 1$), nicht überkonsolidierten bindigen Boden

5.1.2 Einaxialer Druckversuch (DIN 18 136)

Die Versuchsdurchführung ist in DIN 18136 festgelegt. Zweck des Einaxialversuches ist es, die einaxiale Druckfestigkeit an zylindrischen oder prismatischen Probekörpern bei konstanter Abschereschwindigkeit und unbehinderter Seitendehnung zu ermitteln.

Die Höhe des Probekörpers soll das 2 - 2,5-fache des Durchmessers betragen. Der Durchmesser des Probekörpers soll mindestens das 6-fache, besser das 10 - 12-fache des Größtkorndurchmesser sein. Ein Durchmesser von 36 mm soll nicht unterschritten werden. Dieser Mindestdurchmesser ist bei feinkörnigen Böden die Regel. Bei inhomogenen Materialien sind größere Durchmesser bis 100 mm anzustreben.

Bei natürlichen Bodenproben kann der Prüfkörper durch Ausstechen mit einem dünnwandigen Ausstechzylinder gewonnen werden. Bei aufbereitetem Material ist der Prüfkörper durch Einstampfen oder Einpressen in eine Form herzustellen. Die Relation Größtkorndurchmesser/Prüfkörperdurchmesser sollte sinngemäß auch auf das Verhältnis Einzelaggregatgröße/Prüfkörperdurchmesser angewendet werden. Dabei ist auf Homogenität hinsichtlich Dichte und Wassergehalt über die Probenhöhe zu achten. Das Versuchsergebnis wird sehr stark (s.a. Abschn. 4.3.2.1.1) vom Wassergehalt beeinflusst. Abb. 5.2 zeigt Gerätschaften zur Herstellung von proctorverdichteten Prüfkörpern mit 36 und 50 mm Durchmesser. Die Fallmasse und die Fallhöhe des Verdichtungsgerätes sind an die Probenvolumina angepasst.

Die Verformungsgeschwindigkeit soll in der Regel mit 1 % der Anfangshöhe der Probe in der Minute aufgebracht werden.

Der Einaxialversuch ist beendet, wenn der Bruch eingetreten ist und das Maximum der Axialkraft überschritten ist. Wird kein Maximum der Axialkraft erreicht, so gilt der Versuch als beendet, wenn die Stauchung $\varepsilon = 20\%$ beträgt (Abb. 5.3).

Für die Prüfung von q_u können Werkstoffprüfmaschinen mindestens der Klasse 3 nach DIN 51 220 eingesetzt werden mit möglichst selbsttätiger Aufzeichnung des Kraft-Höhen-Änderungsverlaufs (Abb. 5.4) des Prüfkörpers. Für den Gelände- bzw. Baustelleneinsatz eignen sich auch Geräte des in Abb. 5.5 dargestellten Bautyps.



Abb. 5.2: Modifizierte Proctorgeräte (\varnothing 36 und 50 mm) zur Herstellung von Prüfkörpern für Einaxialversuche

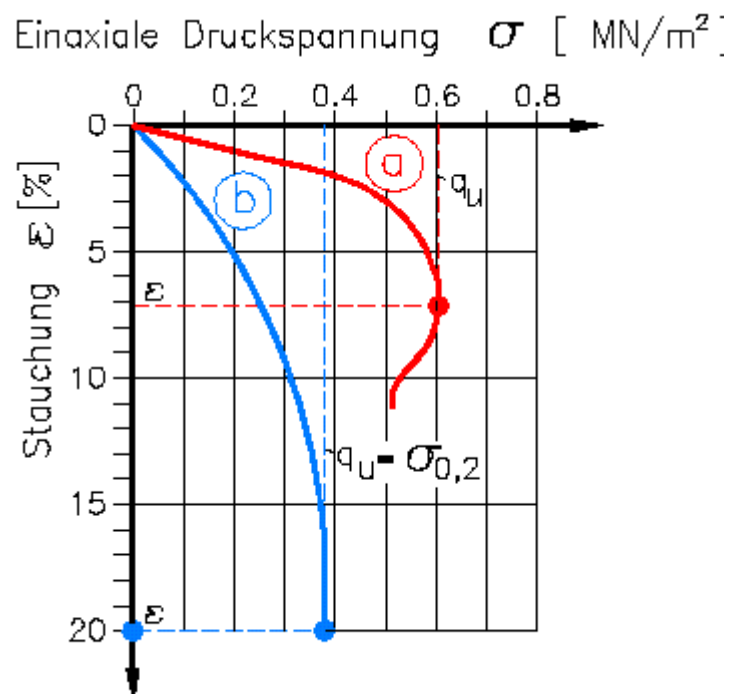


Abb. 5.3: Druck-Stauchungsdiagramme mit (a) und ohne (b) ausgeprägtem Bruchpunkt



Abb. 5.4: Werkstoffprüfmaschine (Klasse 1) mit Aufnahme der Druck-Stauchungslinie
(Geotechnisches Büro, Aachen)

Der Zylinderdruckversuch nach DIN 18136 ist nicht so zuverlässig wie der Dreiaxiale Scherversuch nach DIN 18 137. Zylinderdruck- und Dreiaxialversuche ergeben oft zu niedrige Scherfestigkeiten, weil die Proben mehr oder minder gestört sind und auch nicht unter den im Boden vorhandenen Spannungen untersucht werden. Da darüber hinaus häufig auch die Bedingungen:

- normalkonsolidiert,
- wassergesättigt

nicht erfüllt sind, wird tatsächlich nicht die wahre Festigkeit des Erdstoffes in totalen Spannungen ermittelt. Aus diesen Gründen wird die einaxiale Druckfestigkeit mehr als eine Index-Eigenschaft zur Beurteilung der Konsistenz betrachtet (s.a. Abschn. 4.3.4).

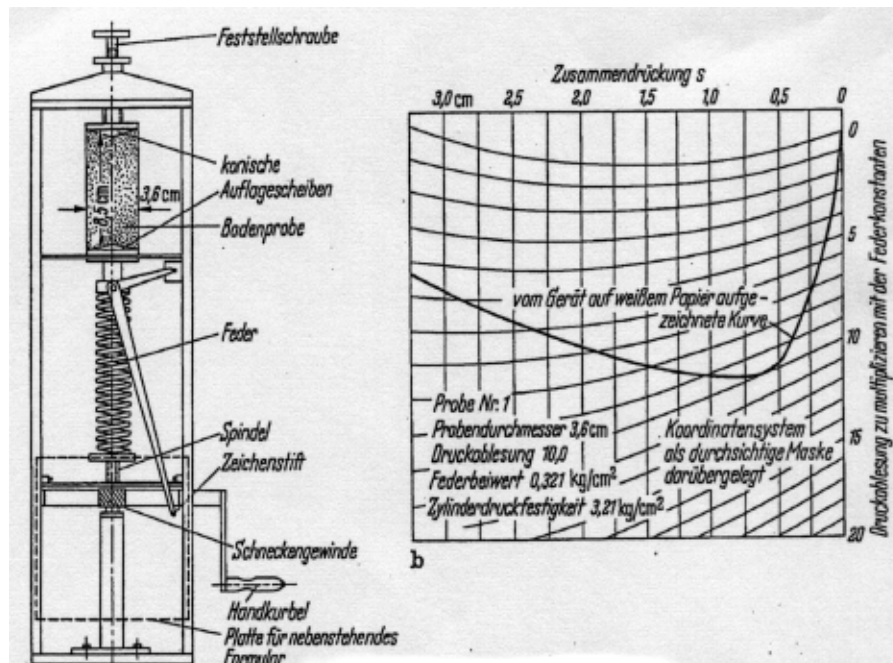


Abb. 5.5: Zylinderdruckversuch
 a) selbstregistrierendes Baustellengerät
 b) Druck-Stauchungslinie

5.1.3 Flügelscherversuch

5.1.3.1 Insitu-Versuch (Feldsonde nach DIN 4096)

Abb. 5.6 zeigt ein Feldgerät zur Bestimmung der undrained Kohäsion c_u im Bohrloch. Beim Drehen des Flügels entsteht eine zylindrische Scherfuge, in der keine Volumenänderungen stattfinden. Am Mantel und an den Stirnflächen ($H = 2 \cdot D$) wird unterstellt, dass gleich große Schubspannungen der Größe $\tau_{FS} = \tau_H = \tau_V = c_u$ der Drehung entgegenwirken. Aus dem Gleichgewicht der Momente um die Flügelachse berechnet man:

$$\tau_{FS} = c_u = \frac{6 \cdot M_d}{7 \cdot \pi \cdot d^3}$$

wobei M_d das maximale Drehmoment und D die Flügelbreite bezeichnet.

Erfahrungsgemäß gibt die Flügelsonde zuverlässige Werte nur für wassergesättigte oder nahezu wassergesättigte ($S_r \geq 0,95$) normalkonsolidierte und auch noch leicht überkonsolidierte Böden bzw. Ab-

fallstoffen. In wassergesättigten organischen Schichten sind die Ergebnisse nur auswertbar, wenn keine faserigen Bestandteile enthalten sind.

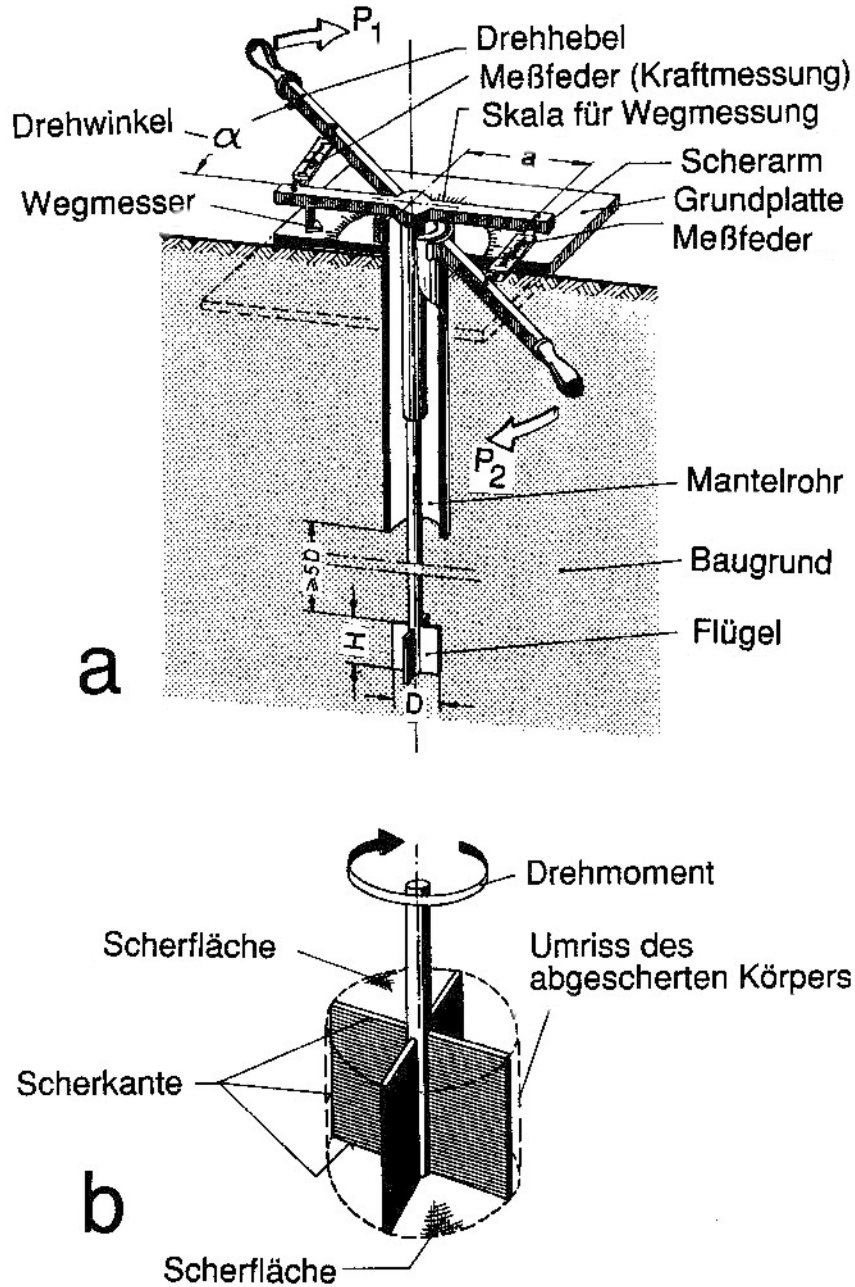


Abb. 5.6: Flügelversuche zur Bestimmung der nicht entwässerten Kohäsion c_u von bindigen Böden im Bohrloch
 a) Gerät
 b) Scherfläche, Flügelgeometrie

Bei nichtbindigen Böden oder nicht wassergesättigten bindigen Böden, bei denen der Reibungswinkel im Schnellversuch nicht gleich Null ist, erhält man zwar die Gesamtscherfestigkeit, ihre Trennung in Reibungs- und Kohäsionsanteil ist aber nicht möglich, da die wirksamen Spannungen beim Abscheren nicht bekannt sind (JONES, 1968). Der insitu-Flügelversuch kann den generellen Vorteil eines insitu-Versuchs für sich in Anspruch nehmen. Dieser bezieht sich vor allem auf die im Laborversuch nicht so treffend zu duplizierenden Randbedingungen wie die Variation der Spannungen und Verformungen und die Entwässerungsbedingungen in der umgebenden Bodenmasse. Weiterhin können die in den Laborversuchen meist erheblichen Störungen in insitu-Versuchen wesentlich geringer gehalten werden. Günstiger wirkt sich auch das Verhältnis zwischen den Abmessungen möglicher Einschlüsse und den Flügelabmessungen (um den Faktor 10 größer gegenüber der Labor-FS) aus.

Probleme gibt es auch bei der Interpretation des Versuchs. Die Flügelsonde verursacht horizontale und vertikale Bruchflächen. Die auf diesen Flächen mobilisierbaren Festigkeiten sind unterschiedlich (Anisotropie). Verschiedene Formen und verschiedene Abmessungen der Flügel führen dabei zu verschiedenen Werten für c_u .

Weiterhin entspricht der Bruchmechanismus ("mode of failure") keinem in der Praxis auftretendem Versagensmechanismus (Lage der Bruchflächen). Die Annahme einer gleichmäßigen Mobilisierung der Scherfestigkeit entlang der Bruchflächen ist aufgrund der progressiven Bruchverhältnisse im Versuch nicht zutreffend.

Schließlich seien noch die Einflüsse der Anisotropie und der Abschergeschwindigkeit genannt, mit denen sich BJERRUM (1972 u. 1973) schon früh befasst hat. BJERRUM hat gut dokumentierte Böschungsbrüche, für die Flügelsondenwerte vorlagen, nachgerechnet und dabei einen Korrekturbeiwert in Abhängigkeit von der Plastizitätszahl I_p ermittelt. Die mit dem Korrekturfaktor multiplizierten undränierten Scherfestigkeiten der Flügelsondenversuche ergaben in Gleitkreisuntersuchungen Sicherheitsgrade, die eine gute Übereinstimmung mit den aufgetretenen Brüchen zeigten.

Die von BJERRUM vorgeschlagenen Korrekturfaktoren sind noch einmal in Abb. 5.7 wiedergegeben, ergänzt durch Werte anderer Verfasser.

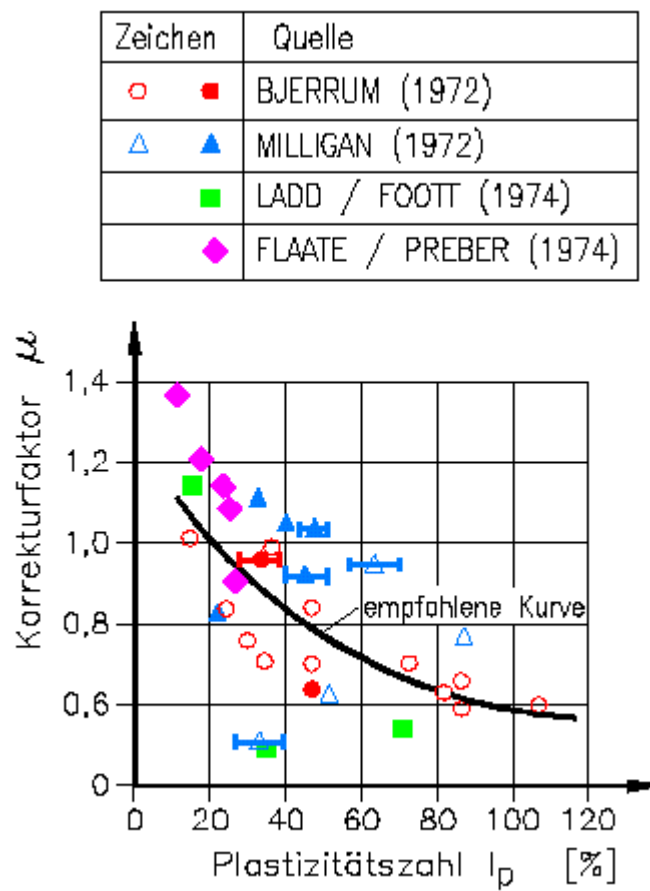


Abb. 5.7: Flügelsondenkorrekturfaktor μ als Funktion der Plastizitätszahl nach BJERRUM (aus: LADD et al., 1977).

Die einzelnen in Abb. 5.7 eingetragenen Punkte zeigen allerdings eine relativ große Streuung. Diese Tatsache, sowie mögliche Unsicherheiten bei der Bestimmung der Plastizitätszahl und der Standstörcherheitsberechnung mittels Gleitkreise haben dazu geführt, dass das ganze Verfahren inzwischen in der Geotechnik zunehmend in Frage gestellt wird.

BJERRUM's Interpretation besagt, dass die undrained Scherfestigkeit c_u magerer (kleine Plastizitätszahl), sensitiver Tone in starkem Maße anisotrop ist, so dass die Flügelsondenwerte die durchschnittliche, entlang der wirklichen Bruchfläche mobilisierbare Festigkeit c_u unterschätzen ($I_p < 20\% \rightarrow \mu > 1,0$). Mit zunehmender Plastizität dagegen wird der Einfluss der Abschergeschwindigkeit immer größer, während der Grad der Anisotropie kleiner wird. Die kurze Versuchsdauer führt so zu einer Überschätzung der insitu-Festigkeit ($I_p > 20\% \rightarrow \mu \leq 1,0$).

Abschließend kann festgestellt werden, dass der Flügelsondenversuch auf Grund der theoretischen Interpretationsprobleme wie der 1-axiale Druckversuch nur als "Index"-Versuch für die Beurteilung der Festigkeit angesehen werden kann. Der Flügelsondenversuch kann aber anhand anderer Versuche und/oder örtlicher Erfahrungen (empirische Korrelationen) geeicht werden, so dass dann Ergebnisse erwartet werden können, die auf $\pm 20\%$ genau bzw. reproduzierbar sind.

5.1.3.2 Laborflügelsonde

Für die Bestimmung der Flügelscherfestigkeit von Schlämmen nach dem Arbeitsbericht der ATV/VKS-Fachausschüsse 3.2 und 3.6 (8/89) sind gleichmäßige Bedingungen bei der Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung Voraussetzung für genaue und vergleichbare Ergebnisse. Dabei ist besonderer Wert auf folgende Parameter zu legen: Teilchengröße des Schlammes, Abmessungen des Probekörpers, Verdichtung des Materials und Dichte des Probekörpers.

Der entwässerte Schlamm wird auf eine größte Teilchengröße von ca. 10 mm zerkleinert, bevor er in den geeigneten Probenbehälter eingebaut wird.

Der Probebehälter (kleiner Proctortopf - Abb. 5.8) hat einen Innendurchmesser von 100 mm und eine Probenhöhe von 120 mm. Ein Aufsatzring soll sicherstellen, dass die Probenverdichtung bis zum obersten Rand des Versuchszylinders in der vorgeschriebenen Weise erfolgen kann.

Der Schlamm wird in dem Behälter in drei gleichen Lagen (jeweils ca. 100 mm vor Verdichtung) eingebaut. Für die Verdichtung wird der kleine Proctorhammer eingesetzt: Fallgewicht 2,5 kg, Fallhöhe 300 mm, Durchmesser Aufschlagstück 50 mm (DIN 18127).

Eine Ausgleichsplatte (Durchmesser 99,5 mm), die auf die jeweilige Oberfläche aufgelegt wird, stellt sicher, dass die Verdichtung gleichmäßig über die gesamte Querschnittsfläche erfolgt. Pro Schicht wird mit 10 Schlägen verdichtet. Im Vergleich zum Standard-Proctorversuch wird damit nur ca. 40 % der Verdichtungsarbeit aufgebracht (10 gegenüber 25 Norm-Schlägen).

Nach beendetem Einbau wird der Aufsatzring abgenommen und der überstehende Schlamm an der Oberkante des Versuchszylinders glatt abgeschnitten. Vor der Versuchsdurchführung ist die Dichte und der Wassergehalt zu bestimmen.

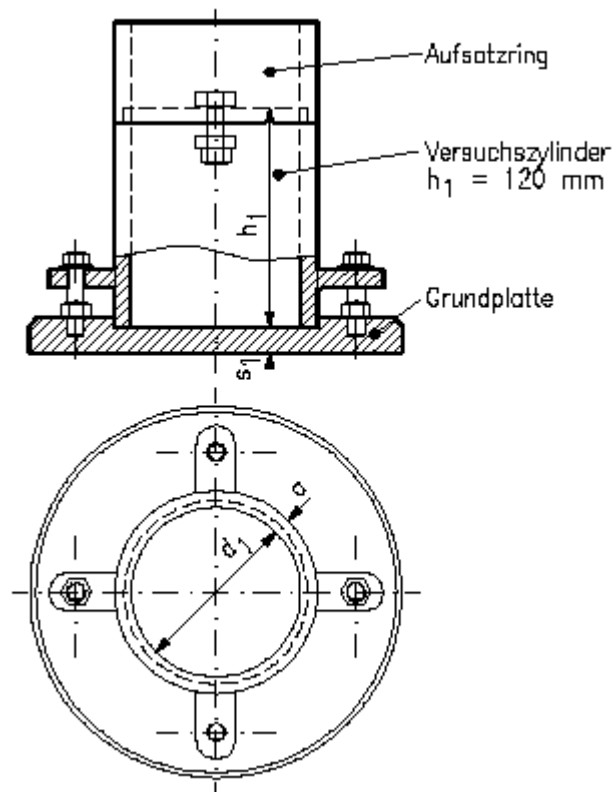


Abb. 5.8: Proctortopf mit Grundplatte und Aufsatzring

Die Flügelscherfestigkeit wird üblicherweise mit dem in Abb. 5.9 dargestellten Gerätetyp bestimmt. Der Messflügel besteht aus 4 gekreuzten rechteckigen Blechen. Das Verhältnis h/d beträgt im Regelfall 1,0. Bei Schlämmen wird üblicherweise der Flügel mit $d = 12,7 \text{ mm}$ eingesetzt. In Abhängigkeit von dem zu erwartenden Scherwiderstand können Flügel mit anderen Abmessungen eingesetzt werden. Vereinzelt wird auch in Anpassung an die Feldflügelsonde das Verhältnis $h/d = 2,0$ verwendet (z.B. VON BLOH/BLÜHEL, 1992). Im Vergleich zu der Feldflügelsonde (Abschn. 5.1.3.1) ist die Gesamtscherfläche um den Faktor 30 - 70, das erfasste Volumen um den Faktor 400 kleiner, d.h. die Messung reagiert sehr empfindlich auf Materialinhomogenitäten, z.B. faserige Einschlüsse. Damit wirkt sich zwangsläufig ein Maßstabeffekt aus.

Abb. 5.9 zeigt eine Laborflügelsonde zur laborativen Bestimmung der undrännierten Scherfestigkeit ($h/d = 2.0$).

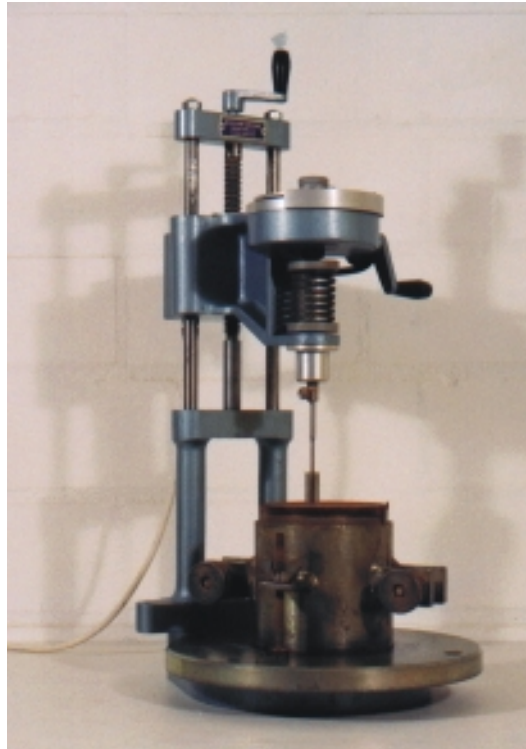


Abb. 5.9: Laborflügelsonde zur Messung der nicht entwässerten Kohäsion $c_u = \tau_{FS}$

Eine Sonderform der Laborflügelsonde stellt die Handflügelsonde dar (Abb. 5.10). In Abhängigkeit von dem zu erwartenden Scherwiderstand (c_u) werden unterschiedliche Flügelgrößen eingesetzt. Die c_u -Werte (Bruchwerte) können direkt an einem Schleppring abgelesen werden. Die Messungen können auch an anderen als proctorverdichteten Prüfkörpern ermittelt werden.



Abb. 5.10: Handflügelsonde

5.1.4 Sonderverfahren

5.1.4.1 Lastplattendruckversuch

Nach EAU (E88) können c_u -Werte im Feld mit schnell ausgeführten Lastplatten-Druckversuchen (Platten-Durchmesser ≤ 30 cm; Versuchsdurchführung in Anlehnung an DIN 18 134) ermittelt werden. Zur Kontrolle sind unterschiedlich große Platten zu verwenden. Der jeweilige c_u -Wert ergibt sich für wassergesättigte Bedingungen nach der Gleichung für die Tragfähigkeit (Grundbruchgleichung) von auf der Erdoberfläche aufgesetzter Platte zu.

$$c_u \approx 1/6 \sigma_{\text{Bruch}}$$

$$\sigma_{\text{Bruch}} = \text{mittlere Sohlnormalspannung beim Bruch des Bodens [kN/m}^2\text{]}$$

Ergibt sich aus der Drucksetzungslinie kein ausgeprägter Bruchpunkt, wird - ähnlich wie beim einaxialen Druckversuch - σ_{Bruch} einer definierten Setzung, hier $s = 1/10$ des Plattendurchmessers zugeordnet.

Die Plattendruckversuche liefern nur zutreffende Werte, wenn sie auf der Geländeoberfläche ausgeführt werden, wobei eine Fläche von mindestens 3-fachem Plattendurchmesser zur Verfügung stehen muss.

5.1.4.2 Druck- und Fallkegelversuch

Ähnlich wie durch die Flügelsondierung (Abschn. 5.1.3) erhält man Angaben über die Anfangsscherfestigkeit c_u und Vergleichswerte zur Bestimmung der Zustandsform verschiedener Böden und Schlämme auch dadurch, dass man die Belastung misst und extrapoliert, die notwendig ist, um einen Kegel 1 cm tief in die Probe eindringen zu lassen (Abb. 5.11).

Beim dänischen Druckkegel mit einem Öffnungswinkel von 60° oder 90° beträgt die Mindestbelastung 500 g, jede weitere Druckstufe ebenfalls 500 g.

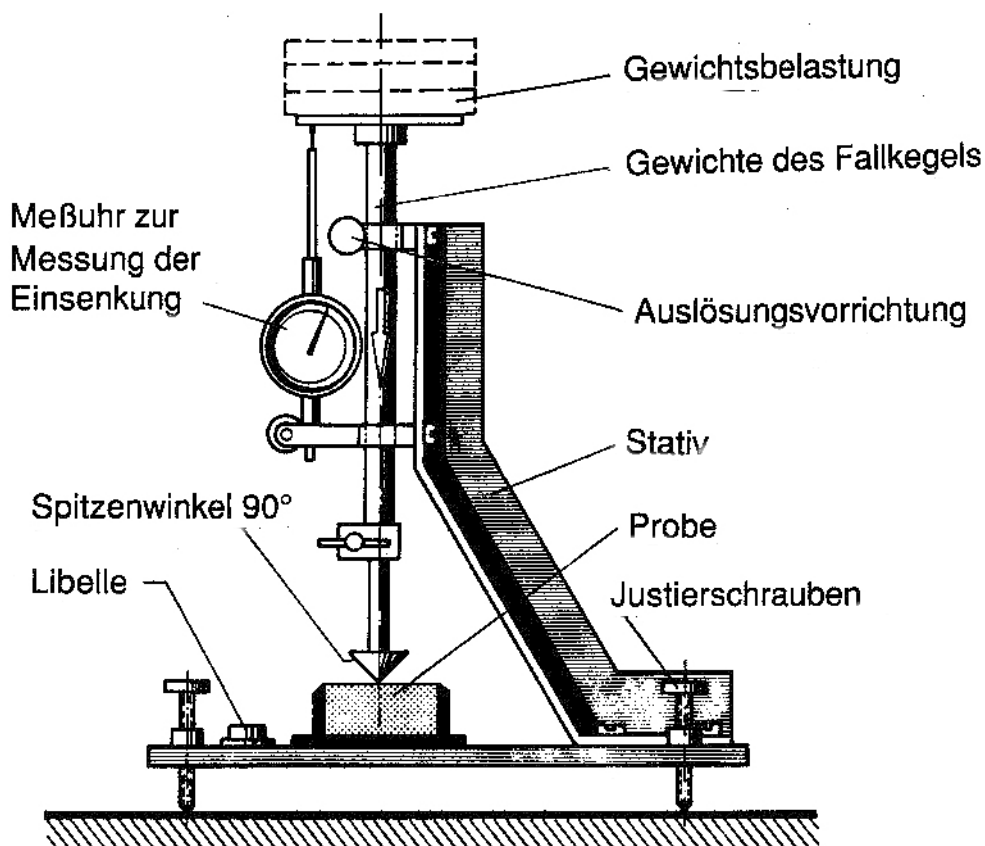


Abb. 5.11: Bestimmung des Kegelwiderstandes (Druckkegel)

Beim schwedischen Fallkegel arbeitet man normalerweise mit einem Öffnungswinkel von 60° und einem festen Gewicht von 80 g. Aus der Eindringung des Kegels kann auf die nicht entwässerte Kohäsion c_u zurückgeschlossen werden. Nach HANSBO (1957) besteht zwischen dem Wert c_u , dem Gewicht des Kegels Q , der Eindringtiefe h und dem Beiwert K , der vom Öffnungswinkel β abhängt, folgende Beziehung:

$$c_u = K \cdot \frac{Q}{h^2} \quad [kN/m^2]$$

Eine Sonderform des Druckkegelversuchs stellt die Vicatnadel dar. Das Versuchsgerät ist in Abb. 5.12 dargestellt. Aus der Eindringtiefe eines zylindrischen Metall-Vollstabes für definierte Last bzw. erforderlichere Belastung für eine definierte Eindringung kann auf die Festigkeit, indirekt damit auch auf c_u zurückgeschlossen werden.

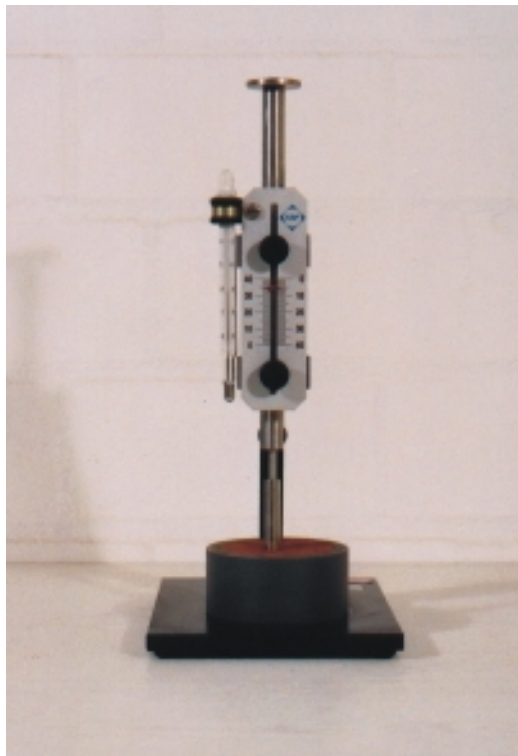


Abb. 5.12:Einsatz einer Vicatnadel

5.1.4.3 Proctornadel

Auf einem ähnlichen Prinzip beruht die Proctornadel, die variable Querschnitte zwischen 0,16 und 6,15 cm² aufweist und mit einer Geschwindigkeit von 1 cm/s in den Boden gedrückt wird. Der Eindringwiderstand entspricht der einaxialen Druckfestigkeit $q_u = 2 \cdot c_u$. Abb. 5.13 zeigt die Proctornadel im Einsatz.



Abb. 5.13:Proctornadel mit Prüfstempel \varnothing 10 mm

Nach einem ähnlichen Prinzip arbeitet das Taschenpenetrometer, das mit unterschiedlichen kegelförmigen oder zylindrischen Adaptern ausgestattet werden kann. Der Penetrometer-Eindringwiderstand kann über Regressionsrechnungen (s. ATV-Berichte, 8/89, S. 907) in Flügelscherfestigkeiten τ_{FS} oder in c_u -Werte umgerechnet werden.

5.1.4.4 Belastungsversuch mit definierter Grenzlast

Für die Ermittlung der axialen Verformung ε unter der Grenzbelastung von 50 kN/m^2 nach Tab. 2.1 wird das in Abb. 5.14 dargestellte Gerät eingesetzt. Es wurde für Spezialuntersuchungen zum Fließverhalten von Schlämmen vom Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung (NLFB) entwickelt. Auf den Belastungskörper ($\varnothing 50 \text{ mm}$) ist eine Messuhr zur Beobachtung der Last-Setzung angebracht.



Abb. 5.14: Belastungsrahmen für Deformationsversuche unter Normbeanspruchung ($q_u = 50 \text{ kN/m}^2$)

5.1.5 Verdichtungsversuch nach Proctor

Die Proctordichte ρ_{Pr} ist definiert als maximale Trockendichte ρ_d , die ein Boden bei einer Verdichtungsart mit verschiedenen Wassergehalten erreichen kann.

Die Verdichtungseigenschaften eines Bodens werden allgemein als Zusammenhang zwischen Verdichtungsarbeit A , Trockendichte ρ_d und Wassergehalt w angesehen, schematisch dargestellt in Abb. 5.15. Mit steigender Verdichtungsarbeit $A_2 > A_1$ verschiebt sich die charakteristische Kurve, so dass ρ_d größer wird und w abnimmt; die Zunahme von ρ_d verringert sich dabei mit steigender Verdichtungsarbeit nach einer logarithmischen Funktion.

Für feinkörnige Böden liegen die Scheitelpunkte der für verschieden große Verdichtungsarbeit ermittelten Verdichtungskurven näherungsweise auf einer spezifischen Sättigungslinie von hyperbolischer Form. Diese spezifische Sättigungszahl $opt\ S_r$ ist somit eine von der Verdichtungsarbeit A unabhängige Größe; sie kennzeichnet die optimale Sättigung der Poren.

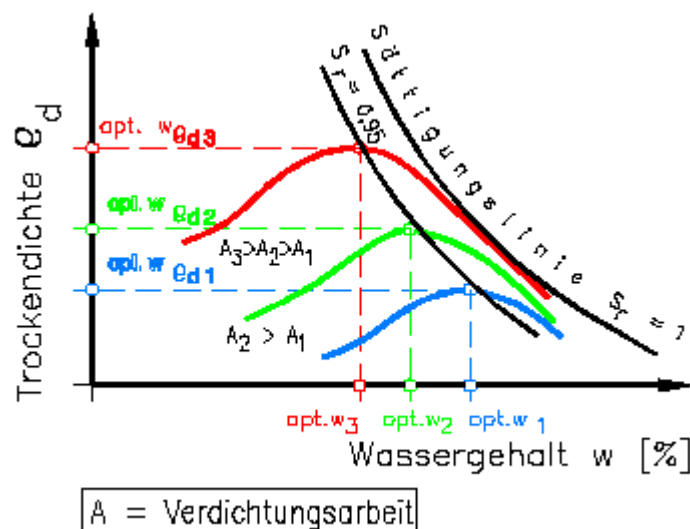


Abb. 5.15: Schematische Darstellung der Verdichtungscharakteristik von Böden

Der Versuch dient zur Bestimmung der Proctordichte, die als Bezugswert zur Beurteilung der erreichten Verdichtung verwendet wird. Ferner lässt das Ergebnis dieses Versuches erkennen, welche Wassergehalte für eine bestimmte Verdichtung eines Bodens günstig sind. Er stellt einen Verdichtungsversuch dar, bei dem die Bodenprobe in einem Metallzylinder durch ein Fallgewicht nach einem bestimmten, in DIN 18 127 beschriebenen Arbeitsverfahren verdichtet wird. Der Gesamtversuch besteht aus mehreren Einzelversuchen mit verschiedenen Wassergehalten. Als Ergebnis erhält

man einen Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt w und der Trockendichte ρ_d . Die aus den Einzelversuchen erhaltenen Trockendichten werden in Abhängigkeit von den Wassergehalten aufgetragen und die einzelnen Punkte durch eine Kurve verbunden (Abb. 5.16). Die Trockendichte, die dem höchsten Punkt dieser Kurve entspricht, wird Proctordichte ρ_{Pr} , der entsprechende Wassergehalt optimaler Wassergehalt w_{Pr} genannt.

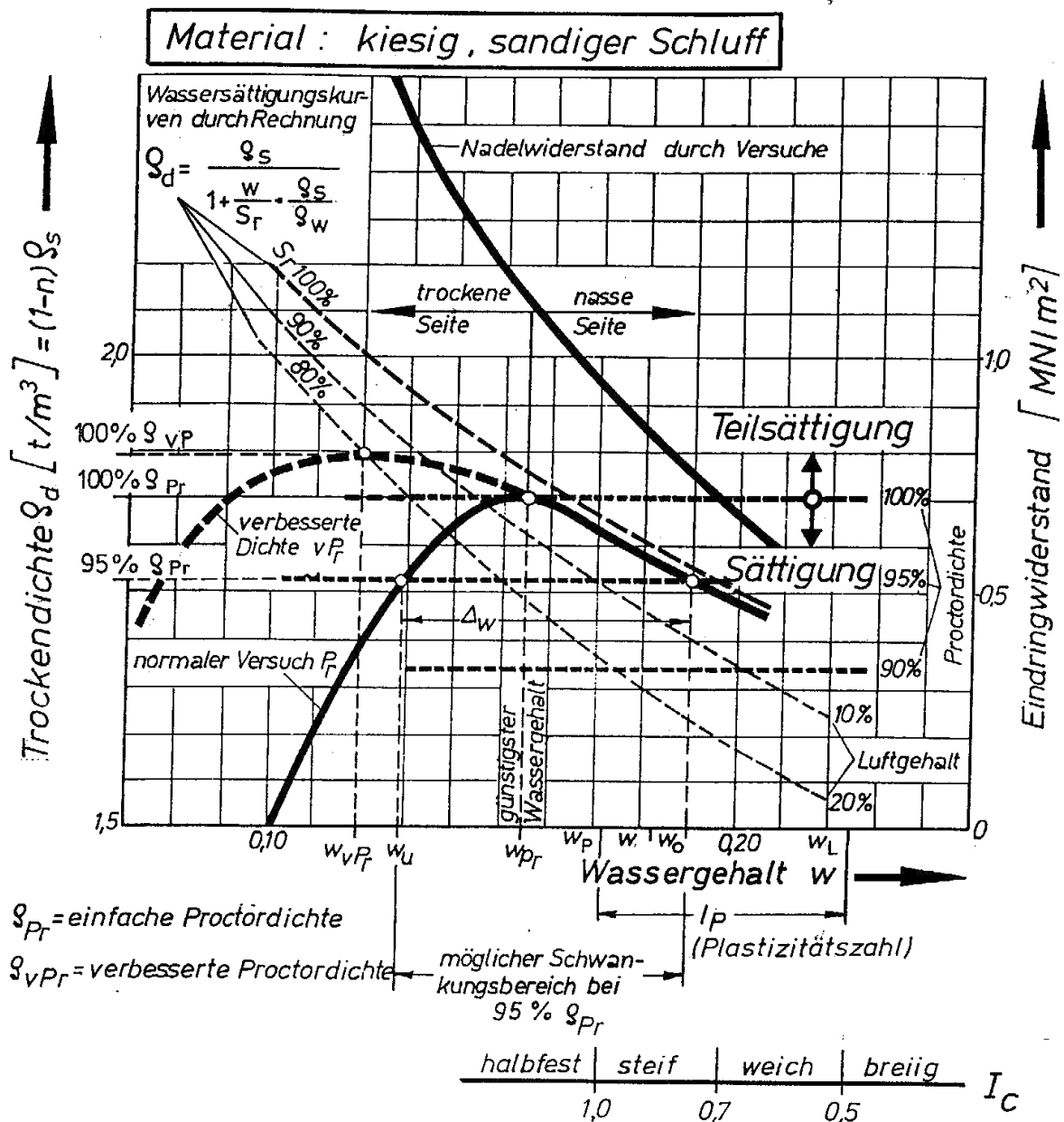


Abb. 5.16: Proctorkurve eines verdichteten Bodens. Abhängigkeit der Trockendichte vom Wassergehalt, Wassersättigungslinien und Eindringwiderstand der Proctornadel (nach EARTH MANUAL, 1974)

Von den drei veränderlichen Größen (Wassergehalt, Trockendichte, Verdichtungsarbeit) wird die volumenbezogene Verdichtungsarbeit A konstant gehalten. Sie entspricht mit $A = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ etwa derjenigen, die auf den Baustellen mit den üblichen Verdichtungsgeräten erreicht wird. Da diese Verdichtung für manche Fälle zu gering ist, hat man zusätzlich die verbesserte Proctordichte mit $A = 2,75 \text{ MNm/m}^3$ geschaffen, die der Verdichtungskapazität der schweren Verdichtungsgeräte in etwa entspricht. In Sonderfällen kann auch eine niedrigere Verdichtungsarbeit zugrundegelegt werden (Abb. 5.17).

Man erkennt aus Abb. 5.15, 5.16 und 5.17, dass bei geringem Wassergehalt das Maximum der Trockendichte nicht erreicht wird. Der Grund ist, dass nicht genug Wasser zum "Gleiten" der Bodenkörner in eine dichtere Lagerung vorhanden ist.

Ebenso liegt bei relativ hohem Wassergehalt die erreichbare Trockendichte unter dem Maximum. Hier sind die Hohlräume des Bodens schon so stark mit Wasser gefüllt, dass eine Verschiebung der Körner in eine dichtere Lagerung ebenfalls nicht möglich ist. Wassergesättigte Böden lassen sich daher wegen der Inkompressibilität des Wassers nicht verdichten, sofern sie nicht gleichzeitig entwässern können. Bei nassem Einbau wird die Annäherung an die Sättigungslinie bereits bei einer Verdichtungsarbeit erzielt, die deutlich unter der Standardverdichtungsarbeit $A = 0,6 \text{ MN/m}^3$ liegt (s.a. Abb. 5.17).

Der optimale Wassergehalt für die Norm-Verdichtungsarbeit A lässt sich mit Hilfe der Ausrollgrenze abschätzen, und zwar kann er bei leichtplastischem Boden mit 2 - 4 % und bei ausgeprägt plastischem Boden mit 3 - 6 % unterhalb von w_p angegeben werden (s.a. Abb. 6.16 und 6.17).

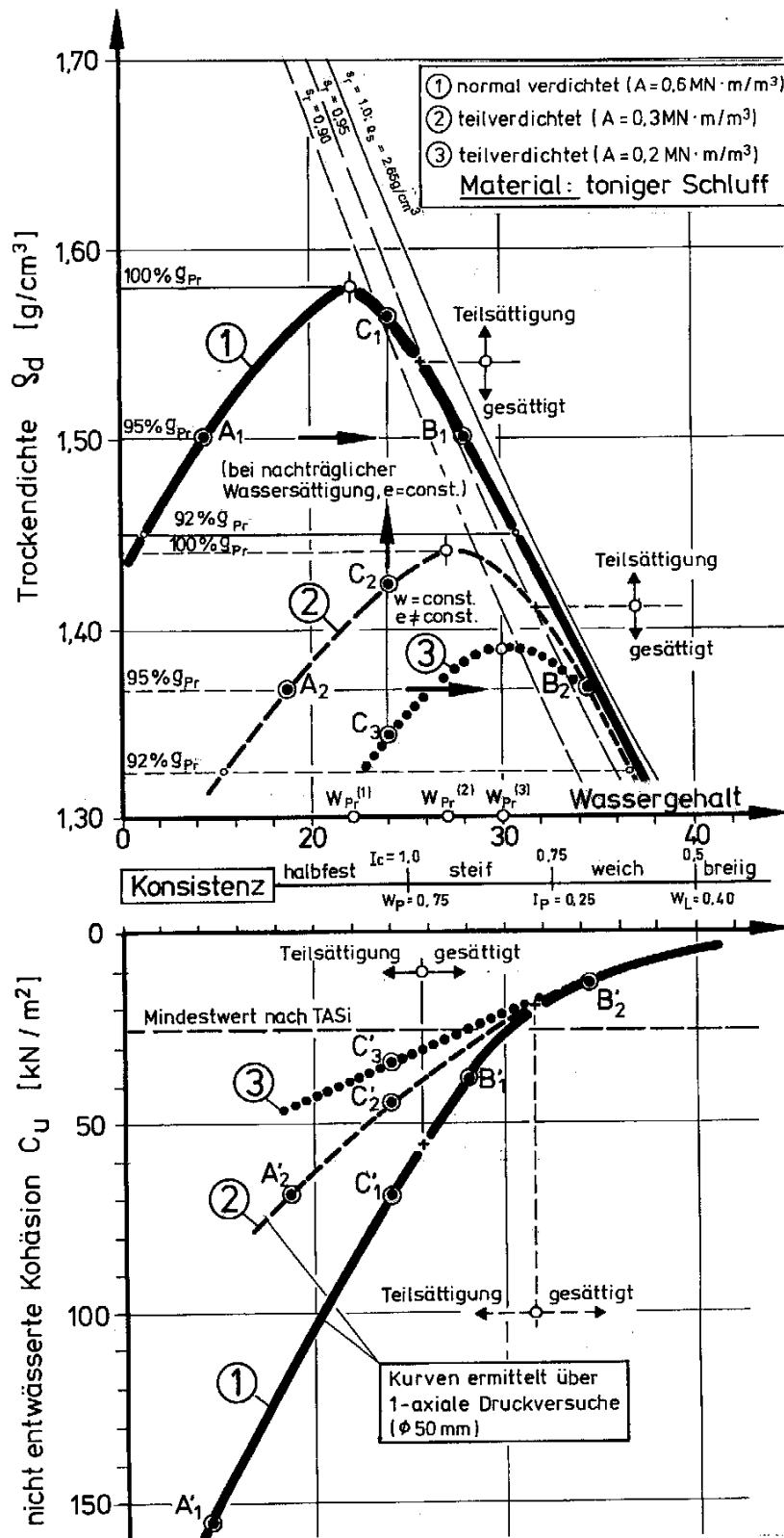


Abb. 5.17: Proctorkurve eines tonigen Schluffes mit 3 Proctorkurven unterschiedlicher Verdichtungsarbeiten (A_{Pr} , 0,5 und 0,3 A_{Pr}) und nicht entwässerte Kohäsion c_u (Geotechnisches Büro, 1998)

5.1.6 Beziehung zwischen Verdichtung nach Proctor, Einbauwassergehalt und Bodenfestigkeit

Beispielhaft wird dieser Zusammenhang an zwei unterschiedlichen Materialien verdeutlicht. Bei Beispiel 1 (Abb. 5.16) handelt es sich um einen bindigen Mischboden (SU nach DIN 18196), bei Beispiel 2 (Abb. 5.17) um einen leicht-mittelplastischen tonigen Schluff (TL - TM). Im Gegensatz zum vorhergehenden Beispiel ist hier zusätzlich zur Normalverdichtung ($A = 0,6 \text{ MN m/m}^3$) die Verdichtungsarbeit der Kurven 2 und 3 auf 50 bzw. 33 % reduziert worden.

Mit steigendem Wassergehalt gehen feinkörnige Böden von der festen über die halbfeste, steife und weiche in die breiige Zustandsform über. In der gleichen Reihenfolge nimmt die Festigkeit ab.

Abb. 5.16 zeigt, dass bei 100 % ρ_{Pr} das untersuchte Material eine halbfeste Zustandsform ($I_c > 1$) besitzt und bei einem Verdichtungsgrad entsprechend 92 % ρ_{Pr} in den breiigen Zustand übergeht. Für 95 % ρ_{Pr} liegt noch die steife Konsistenz vor.

In Abb. 5.16 ist zusätzlich zur Proctorkurve der Eindringwiderstand einer Proctornadel aufgetragen. Für vorgegebene Verdichtungsarbeit ist die Festigkeit eindeutig eine Funktion des Wassergehaltes. Mit steigenden Einbauwassergehalten nimmt der Nadelwiderstand und damit die Festigkeit signifikant ab.

In Abb. 5.17 sind die Ergebnisse von 3 Proctorserien mit unterschiedlichen Verdichtungsarbeiten (100 % A_{Pr} , ~ 50 % A_{Pr} und ~ 33 % A_{Pr} dargestellt. Als Material wurde ein schwach bindiger toniger Schluff ausgewählt. Zusätzlich zu den Proctorkurven wurden für verschiedene Verdichtungsarbeiten und Einbauwassergehalte die einaxialen Druckfestigkeiten ($\varnothing 50 \text{ mm}$, $h/\varnothing = 2,0$) ermittelt und darüber die nicht entwässerte Kohäsion c_u berechnet ($c_u = 0,5 \cdot q_u$). In Abb. 5.17 wird deutlich, dass in dem Bereich, in dem für alle 3 Proctorkurven nahezu Sättigung vorliegt ($S_r \geq 0,95$) die nicht entwässerte Kohäsion c_u versuchsstechnisch etwa gleichgroß ausfällt. Das gilt etwa ab einem Wassergehalt w von 31 %. Unterhalb dieses Wassergehaltes liegt nur noch der nasse Ast der Kurve 1 bis etwa $w = 25 \%$ im gesättigten Bereich. Unterhalb dieses Wassergehaltes wiederum geht der Boden in die Teilsättigung über, in dem die nicht entwässerte Kohäsion c_u nicht mehr definierbar ist. Tatsächlich wird der Gesamtscherwiderstand gemessen ohne Möglichkeit der Trennung der Anteile an Reibung φ_u und Kohäsion c_u . Näherungsweise Sättigung ist nur rechts vom optimalen Wassergehalt (nasser

Ast) gegeben. Links vom Optimum (trockener Ast) liegt nur Teilsättigung bei entsprechend hoher Festigkeit vor. Folgende weitere wesentliche Ergebnisse sind festzuhalten:

1. Mit abnehmender Verdichtungsarbeit nehmen die Proctordichten ρ_{Pr} ab und die Proctorwassergehalte w_{Pr} zu.
2. Die Festigkeitskurven $c_u = f(w)$ zeigen folgende Charakteristik: Im Bereich der gemeinsamen Sättigung liegen die c_u -Werte quasi im gleichen Niveau unabhängig von der Verdichtungsarbeit. Erst mit geringeren Wassergehalten, wenn die Kurven in den Bereich der Teilsättigung ($S_r < 0,95$) übergehen, laufen die Kurven auseinander. Die Kurve 1 liefert signifikant höhere Werte als die Kurven 2 und 3. Im Grunde werden damit die theoretischen Zusammenhänge nach Abschn. 3.2 sehr gut bestätigt.
3. Die Kurvenverläufe nach Abb. 5.17 lassen folgende Interpretationen zu, die das Festigkeitsverhalten gesättigter und teilgesättigter feinkörniger Böden bzw. Abfälle erläutern:

Fall 1: Nachträgliche Wassersättigung bei konstanter Porenzahl.

Ein solcher Fall liegt vor, wenn ein Erdstoff mit einer Trockendichte entsprechend den Pkt. A_1 und A_2 vorliegt und anschließend durch Wasserzufuhr (z. B. Regenereignis) wassergesättigt wird, d.h., wenn die Punkte A_1 und A_2 in die Punkte B_1 und B_2 übergehen. Allein als Folge der Sättigung gehen die Festigkeiten von A_1' und A_2' auf die Werte B_1' und B_2' zurück. Der Festigkeitsabfall ist um so größer, je geringer die Teilsättigung vorher war.

Fall 2: Nachträgliche Reduzierung der Porenzahl bei konstantem Wassergehalt.

Hier wird der Fall betrachtet, dass ein ursprünglich gering verdichtetes Material bei konstantem Wassergehalt nachträglich verdichtet wird. Diese nachträgliche Verdichtung kann auch durch eine Setzung infolge Auflasterhöhung im Deponiebetrieb verursacht sein. In Abb. 5.17 ist diese Situation im Bereich der Teilsättigung durch die Punkte C_3 , C_2 und C_1 beschrieben. Entsprechend der Verringerung der Porenzahl nehmen die Festigkeiten c_u von C_3' über C_2' auf C_1' zu.

Fall 3: Nachträgliche Reduzierung der Porenzahl und Wassergehaltserhöhung.

In der Deponiepraxis kann auch eine Kombination aus den Fällen 1 und 2 auftreten. Ein Beispiel wäre, dass der Punkt A_2 sich nach B_1 verschiebt, was einer Reduzierung der Festigkeit von A_2' nach B_1' entspräche.

Fall 4: Nachträgliche Reduzierung der Porenzahl bei Wassersättigung.

Liegt bereits bei niedrigen Einbaudicken Wassersättigung vor (z.B. Pkt. B_2), ist eine Setzung oder Komprimierung nur möglich, wenn Porenwasser ausgepresst werden kann. Dies ist nach Abschn. 4.3.3 ein Konsolidationsprozess, der über die Parameter Auflastspannung, k-Wert, E_s - bzw. C_c -Wert und die Zeit t gesteuert wird. Konsolidation und damit Abnahme von e (entspricht Zunahme von ρ_d) ist mit einer Festigkeitszunahme verbunden. Am Beispiel der Abb. 5.17 erläutert, würde eine Verschiebung von B_2 nach B_1 mit einer Festigkeitszunahme von B_2' nach B_1' verknüpft sein.

5.1.7 Maßgebende Einflussgrößen und Schlussfolgerungen für eine Vereinheitlichung der Versuchsdurchführung

Aus den vorangegangenen Ausführungen, Literaturquellen und Beispielen können folgende wesentlichen Schlüsse gezogen werden:

- Die nicht entwässerte Kohäsion c_u bzw. die einaxiale Druckfestigkeit q_u beschreiben die Scherfestigkeit eindeutig nur für feinkörnige, weitgehend wassergesättigte und normalverdichtete (normalkonsolidierte) Erdstoffe oder vergleichbare Abfallstoffe. Voraussetzung sind also Wassersättigung ($S_r > 0,95$) und volumenkonstante Scherung bzw. Verformung. Für diesen Fall hat auch die theoretische Beziehung Gültigkeit: $c_u = 0,5 \cdot q_u$ bzw. $c_u = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$. Nur unter diesen Voraussetzungen ist $\varphi_u = 0$.
- c_u bzw. q_u sind auch in ihrem strengen Gültigkeitsbereich ($S_r \sim 1$) keine Materialkonstanten, sondern exponentiell abhängig vom Wassergehalt und damit von der effektiven Normalspannung bzw. äquivalenten Spannung σ_e unter der der Boden vorher konsolidiert wurde.

- Der für einen bestimmten Wassergehalt maßgebende c_u -Wert (dies gilt sowohl für die Herleitung aus Dreiaxial- als auch aus Flügelscherversuchen) ist zusätzlich abhängig von der Schergeschwindigkeit. Eine Erhöhung von $\dot{\gamma}$ führt zu einer Erhöhung, eine Verkleinerung von $\dot{\gamma}$ zu einer Reduzierung. Ursache ist die Gültigkeit des "Zähigkeitsgesetzes".
- Von weiterem Einfluss auf c_u kann eine Gefügestörung beim Aufbereiten (z.B. im Zusammenhang mit der Herstellung von Prüfkörpern) des Materials sein, ausgedrückt durch den Parameter Sensitivität

$$S_t = \frac{c_u \text{ ungestört}}{c_u \text{ gestört}}$$

- An der Fließgrenze w_L (Übergang von der breiigen zur weichen Konsistenz) ist der Einfluss nach dtzg. Kenntnisstand vernachlässigbar ($S_t = 1$), kann aber im weichen bis steifen Bereich auf Werte $S_t > 1$ ansteigen. S_t dürfte i.w. von dem Gefüge im Feinkornbereich und dem Chemismus des Porenwassers gesteuert werden. Bei thixotropem Verhalten ist der Festigkeitsabfall durch Störung z.T. wieder reversibel, weshalb dem Prüfzeitpunkt nach Probenherstellung Bedeutung zukommt.
- Bei schneller Belastung im teilgesättigten Bereich ($S_t < 0,95$) ist bei bindigen Erdstoffen und vergleichbaren Abfällen mit dem empfohlenen Verfahren nur noch die Gesamtscherfestigkeit ($c_u, \varphi_u \neq 0$) zu ermitteln, eine Trennung in Kohäsions- und Reibungsanteil ist nicht möglich. In diesem Bereich nimmt die Gesamtscherfestigkeit mit der Vorbelastung und dem Verdichtungsgrad zu, der gemessene c_u - bzw. q_u -Wert übernimmt ausschließlich die Funktion eines Index-Parameters zur Beschreibung der Zustandsform und damit indirekt der Festigkeit und Tragfähigkeit.
- Für nichtbindige Bodenarten oder damit vergleichbare Abfälle haben die Parameter c_u und q_u keine Aussagekraft. Aufgrund der guten Entwässerbarkeit lässt sich der Anfangszustand ($\varphi_u = 0, c_u$) nicht definieren. Damit hat auch die Beziehung $c_u = q_u/2$ keine theoretische und praktische Grundlagen. Die Festigkeit (Trag- und Scherfestigkeit) wird nicht vom Wassergehalt sondern ausschließlich von der Lagerungsdichte gesteuert. Trotz hoher Festigkeit (E_s, φ') würde ein (Strahl-) Sand z.B. kaum messbare 1-axiale Druckfestigkeiten liefern.
- Die in der AbfAbIV und der TA Abfall ausgewiesenen Zahlenwerte sind als untere zulässige Festigkeitsgrenzen (Mindestwerte) für die oberirdische Ablagerung von Abfällen definiert. Sie sagen nichts aus über die tatsächlich geforderten Werte, die sich ausschließlich auf der Grundlage von statischen Nachweisen für die Stabilität des Deponiekörpers ergeben. Unter Stabilität ist dabei gemeint, dass sowohl im Betrieb wie auch im Endzustand keine kritischen Verformungs-

und/oder Bruchzustände auftreten dürfen, die die Gebrauchstauglichkeit des Systems einschränken. Art und Umfang der statischen Nachweise einschließlich Sicherheitskonzept und die hierfür erforderlichen Parameter orientieren sich maßgebend am jeweiligen Deponie- und Betriebskonzept. Die für diese Stabilitätsnachweise erforderlichen Parameter lassen sich nicht nur an c_u - und/oder q_u -Werten festmachen und können im Einzelfall umfassendere geotechnische Prüfungen beinhalten.

- Neben den genannten, aus der Bodenphysik resultierenden Abhängigkeiten und Gesetzmäßigkeiten, können folgende arbeits- und versuchstechnischen Einflüsse Auswirkungen auf die Zielgrößen c_u bzw. q_u haben. Sie werden in weiteren Arbeitsschritten (s. Teil II) für ausgewählte Abfallstoffe (Schlämme) quantifiziert und damit auf ihre Gültigkeit überprüft.

Im einzelnen sind dies:

- Prüfkörperabmessungen relativ zum Größtkorn bzw. zur Einzelaggregatgröße (=f(WG, Aufbereitung)) bei Einaxial- und Flügelscherversuchen einschließlich Art der Materialaufbereitung. Ein signifikanter Einfluss dürfte eher im Bereich der Teilsättigung vorliegen, weniger bei Annäherung an die Sättigung im weichen/breiigen Bereich.
- Klärung des Einflusses faseriger Komponenten auf die Zielgrößen q_u , c_u in Abhängigkeit von den Prüfkörper- und Flügelabmessungen.
- Auswirkungen der Zahl der Einzellagen bei Herstellung des Prüfkörpers auf die Homogenität des zu prüfenden Materials. Gegenüber dem Standard-Proctortopf (τ_{FS} -Messung), (Dicke der Einzellege im Verhältnis zum Durchmesser = 0,4) wird dztg. im kleinen Proctortopf (\varnothing 36 oder 50 mm) ein Verhältniswert von 0,67 erreicht. Bei 5 Lagen wäre der Verhältniswert ebenfalls auf 0,4 reduziert.
- Vergleichbarkeit der bei verschiedenen Prüfkörperabmessungen (\varnothing = 36, 50 mm; Höhe H = 90, 125 mm, H/\varnothing = 2,5 : 1) für die Verdichtung aktivierbaren Arbeit.
- Einfluss der Verdichtungsarbeit auf die Parameter: ρ , e , S_r , c_u , τ_{FS} getrennt für den gesättigten und nicht gesättigten Bereich.

- Einfluss der Zeit (Prüfbeginn) nach Herstellung der Prüfkörper auf die Zielgrößen c_u und q_u vor allem bei hohen Sättigungsgraden (Einfluss der Thixotropie).
- Einfluss der Belastungs- und Schergeschwindigkeit auf die Ergebnisse der Druck- und Flügelsondenversuche.

6 Ergebnisse von Laborversuchen

6.1 Ausgewählte Materialien

In die praktischen Untersuchungen wurden folgende Materialien einbezogen:

1. Gipsschlamm mit schädlichen Verunreinigungen,
2. Galvanikschlamm,
3. Eisenoxidschlamm/Endschlamm Chromerzaufschluss,
4. Eisenhydroxidschlamm,
5. Glauberit,
6. Gips aus Baycrom F.

6.2 Untersuchungsprogramm

Die Schwerpunkte der Untersuchungen lagen bei:

- Variation der Verdichtungsarbeit bei Herstellung der Prüfkörper,
- Herstellung von Prüfkörpern mit unterschiedlichem Durchmesser (\varnothing 36 u. 50 mm),
- Durchführung von Flügelscherversuchen unter Variation folgender Bedingungen:
 - Flügelabmessungen ($h/b = 2,0$, $h/b = 1,0$),
 - Drehgeschwindigkeit des Flügels ($10^\circ/\text{min.}$, $30^\circ/\text{min.}$),
 - aufgebrauchte Verdichtungsarbeit,
 - Einbauwassergehalt bzw. Sättigungsgrad,
 - Einfluss der Zeit (Prüfbeginn) nach Herstellung der Prüfkörper,
- Durchführung von 1-axialen Druckversuchen unter Variation folgender Bedingungen:
 - Verformungs(vorschub-)geschwindigkeit (1% von h_a/min , $30\text{ mm}/\text{min}$),
 - aufgebrauchte Verdichtungsarbeit,
 - Prüfkörperabmessungen,

- Einbauwassergehalt bzw. Sättigungsgrad,
- Einfluss des Zeitpunktes der Prüfung nach Prüfkörperherstellung.

Für den Galvanik- und Eisenhydroxydschlamm (1 und 4) wurde neben dem Material mit natürlichem Wassergehalt mit in mehreren Stufen heruntergetrockneten Teilproben gearbeitet. Die Materialien 5 und 6 wurden jeweils nur mit dem Auslieferungswassergehalt untersucht.

6.3 Ergebnisse

6.3.1 Klassifikation nach DIN 18 196

Die Kornverteilung mittels Sedimentation war im Normalverfahren nach DIN 18 123 nur für den Eisenoxidschlamm möglich. Alle Proben liegen im Ton-Schluff-Bereich und sind als schwach bis mittelbindig anzusprechen.

Die Ermittlung der Grenzwassergehalte (Fließ- und Ausrollgrenze) und damit die rechnerische Ermittlung von Plastizitätszahl I_p und Konsistenzzahl I_c war aufgrund des thixotropen Verhaltens nicht möglich.

Die Konsistenz nach Ansprache liegt im weichen-breiiigen bzw. weichen bis steifen Konsistenzbereich. Eine Zusammenstellung der Ergebnisse findet sich in Tab. 6.1.

Tab. 6.1:Klassifikation nach DIN 18 196

Klassifikation nach DIN 18 196						
lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Farbe	Konsistenz	Bodenart	%-Anteil < 0,06 mm	Bemerkungen
1	Gipsschlamm mit schädlichen Verunreinigungen	grau-braun, schwarz	steif bis weich	Schluff, tonig	98	Die Farbe ändert sich von schwarz zu grau-braun bei kurzer offener Lagerungen. Das Material liegt in Klumpen unregelmäßiger Form von 2 - 15 cm Durchmesser vor und ist als steif einzustufen. Nach der Aufbereitung von Hand auf 0,5 - 1 cm Ø ist die Konsistenz als weich einzustufen.
2	Galvanikschlamm	rot-braun, grün	steif bis weich	Ton, Schluff	99	Die Farbe ändert sich von grün zu rot-braun bei kurzer offener Lagerung. Das Konsistenz-verhalten gleicht dem des Gipsschlammes
3	Eisenoxid-schlamm/End-schlamm, Chromerz-rückstand	schwarz-dunkelbraun	weich bis steif	Schluff	98	Das Material liegt in Stücken von 0,2 - 1 cm Ø vor.
4	Eisenhydroxid-schlamm	rot-braun	weich bis breiig	Ton, Schluff	95	Der Feststoff hat sich abgesetzt und freies Wasser stand in jedem Eimer ca. 2 cm oberhalb des Feststoffes.
5	Glauberit	gelb	pulverig	schwach sandiger Schluff	87	Feinkörniges Pulver mit vereinzelt Salzkrystallen. Probe fühlt sich leicht seifig an. Schwach bindiger Habitus, schwach kohäsiv.
6	Gips aus Baycrom F	blau-grau	pulverig	stark sandiger Schluff	55	Probe wirkt leicht feucht. Bei mechanischer Behandlung setzt sich nach oben Wasser ab, die Probe wird dunkler. Schwach bindiger Habitus, schwach kohäsiv.

6.3.2 Ausgangswassergehalte

Die Ausgangswassergehalte nach DIN 18 121 der in die Untersuchungen einbezogenen Schlämme liegen bei:

Galvanikschlamm:	w	= 340 %
Gipsschlamm:	w	= 58 %
Eisenoxidschlamm:	w	= 25 %
Eisenhydroxidschlamm:	w	= 110 %
Glauberit	w	= 5,6 %
Baycrom F	w	= 43,4 %

Der Galvanik-, Gips- und Eisenhydroxidschlamm sowie Baycrom F liegen quasi im gesättigten Zustand, der Eisenoxidschlamm im teilgesättigten Zustand vor. Der Eisenhydroxidschlamm war im natürlichen Anlieferungszustand breiig und musste für verwertbare Untersuchungen auf ca. $w = 95 \%$ heruntergetrocknet werden. Das Glauberit-Material ist relativ trocken ($w \ll w_{Pr}$).

6.3.3 Korndichten

Die Korndichten der untersuchten Abfallstoffe betragen:

Galvanikschlamm:	ρ_s	= 2,59 g/cm ³
Gipsschlamm:	ρ_s	= 3,29 g/cm ³
Eisenoxidschlamm:	ρ_s	= 3,69 g/cm ³
Eisenhydroxidschlamm:	ρ_s	= 3,20 g/cm ³
Glauberit	ρ_s	= 2,85 g/cm ³
Baycrom F	ρ_s	= 3,63 g/cm ³

6.3.4 Scherfestigkeit

6.3.4.1 Entwässerte Bedingungen (φ' , c')

In Kastenscherversuchen wurden folgende wirksame Scherparameter im Spannungsbereich

$\sigma = 0 - 100 \text{ kN/m}^2$ ermittelt:

Schlammtyp	wirksamer Reibungswinkel ϕ' [°]	entwässerte Kohäsion c' [kN/m ²]
Galvanikschlamm:	37,4	0,3
Gipsschlamm:	32,2	13,1
Eisenoxidschlamm:	38,5	0
Eisenhydroxidschlamm:	31,8	12,8
Glauberit	n.b.	n.b.
Baycrom F	n.b.	n.b.

Die entwässerten Scherfestigkeiten liegen in einem auffallend hohen Niveau, das eher für nichtbindige Erdstoffe zu erwarten wäre.

6.3.4.2 Nicht entwässerte Bedingungen (Anfangsgrenzzustand) (c_u , q_u)

Galvanikschlamm

In Abb. 6.1 sind die Ergebnisse zusammengefasst ausgewertet worden.

Die Verdichtungsversuche wurden über alle Verdichtungsstufen im quasi wassergesättigten Bereich ($S_r \sim 1,0$) ausgeführt, d. h. die Variation der Verdichtungsarbeit hat keine Auswirkungen auf den Verdichtungszustand. Bereits bei 5 Schlägen (entspricht 20 % der Arbeit des Normversuches) wird eine weitere Verdichtung durch die Annäherung an die Sättigungslinie verhindert. Die Ausführungen in Abschn. 5.1.5 und 5.1.6 werden damit bestätigt.

Die Druckfestigkeiten q_{u36} und q_{u50} sind nahezu gleich groß, eine Abhängigkeit von der Schlagzahl ist nicht zu erkennen. Beim τ_{FS} -Wert der Flügelsonde ist dagegen eine leichte Abnahme von ca. 30 auf 20 kN/m² zwischen 5 und 20 Schlägen erkennbar.

Das τ_{FS}/q_u -Verhältnis liegt deutlich über dem theoretischen Sollwert von 0,5. Es beginnt mit ca. 2,25 (5 Schläge) und erreicht für 20 Schläge Werte zwischen 1,5 und knapp 2,0.

Bei der vorliegenden Konstellation würde der Mindestwert nach AbfAbIV und TA Abfall vom Parameter τ_{FS} für geringe Schlagzahlen noch eingehalten, der Zuordnungswert für q_u aber deutlich unterschritten. Es kommt quasi zu einer Umkehrung des $\tau_{FS}(c_u)/q_u$ -Wertes gegenüber dem theoretischen Ansatz.

Abb. 6.2 (Verdichtung mit 10 Schlägen) und Abb. 6.3 (Verdichtung mit 15 Schlägen) zeigen für den Galvanikschlamm bei unterschiedlichen Einbauwassergehalten den Festigkeitsverlauf. Mit den einge-

stellten Wassergehalten wird sowohl der wassergesättigte wie auch der nur teilgesättigte Bereich abgedeckt. Der theoretische Zusammenhang, wonach c_u vom Wassergehalt exponentiell abhängt (Abschn. 4.3.2.1.1), wird zumindest qualitativ voll bestätigt. Mit Abnahme des Einbauwassergehaltes nimmt für vorgegebene Verdichtungsarbeit die Trockendichte zu und die Porenzahl entsprechend ab. Die Kurvenverläufe für q_u sind in beiden Abb. nahezu deckungsgleich, für τ_{FS} sind jedoch bei natürlichem Ausgangswassergehalt stärkere Unterschiede gegeben. Der Vergleichswert q_u wird bereichsweise über- und unterschritten. Beim niedrigsten Wassergehalt wird der Messbereich der Flügelsonde bereits überschritten. Abb. 6.4 zeigt eine zusammenfassende Darstellung für τ_{FS} und $q_u = f(\text{Wassergehalt, Schlagzahl})$.

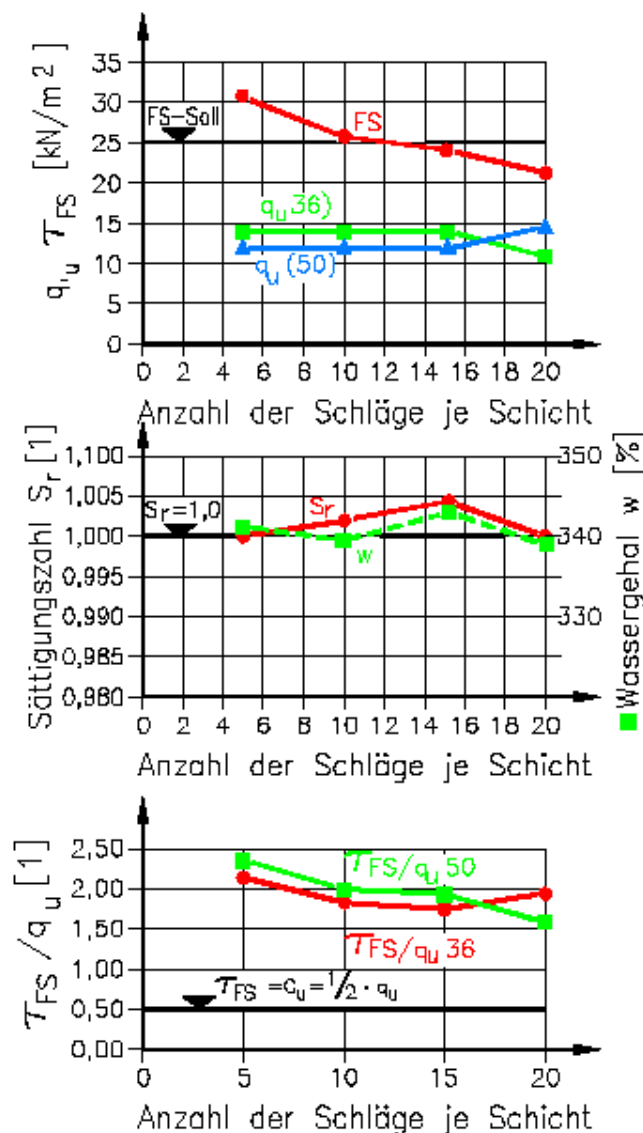


Abb. 6.1: Festigkeitsverlauf (τ_{FS} , q_u) und Sättigungsgrade in Abhängigkeit von der Verdichtungsarbeit (Galvanikschlamm mit Ausgangswassergehalt $w \sim 340\%$)

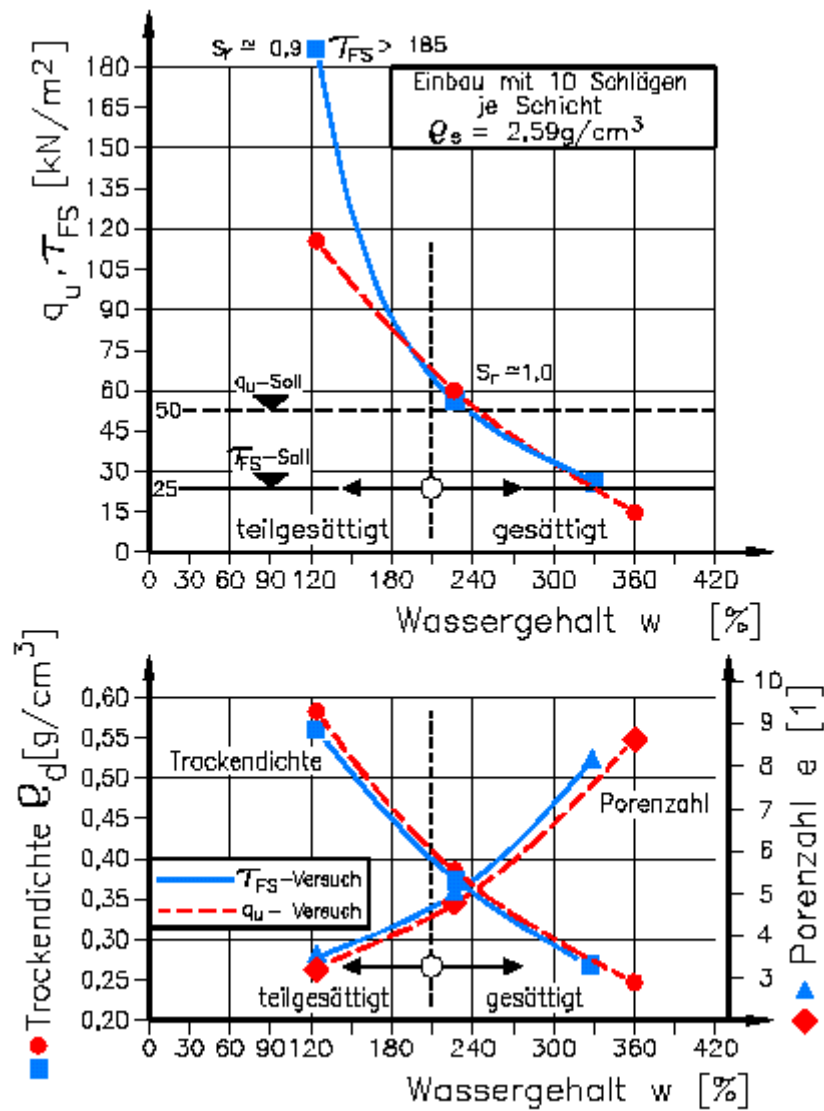


Abb. 6.2: Festigkeitswerte τ_{FS} , q_u sowie Trockendichte ρ_d und Porenzahl e in Abhängigkeit vom Wassergehalt w (Galvanikschlamm mit variablem Wassergehalt); Verdichtung mit 10 Schlägen je Schicht

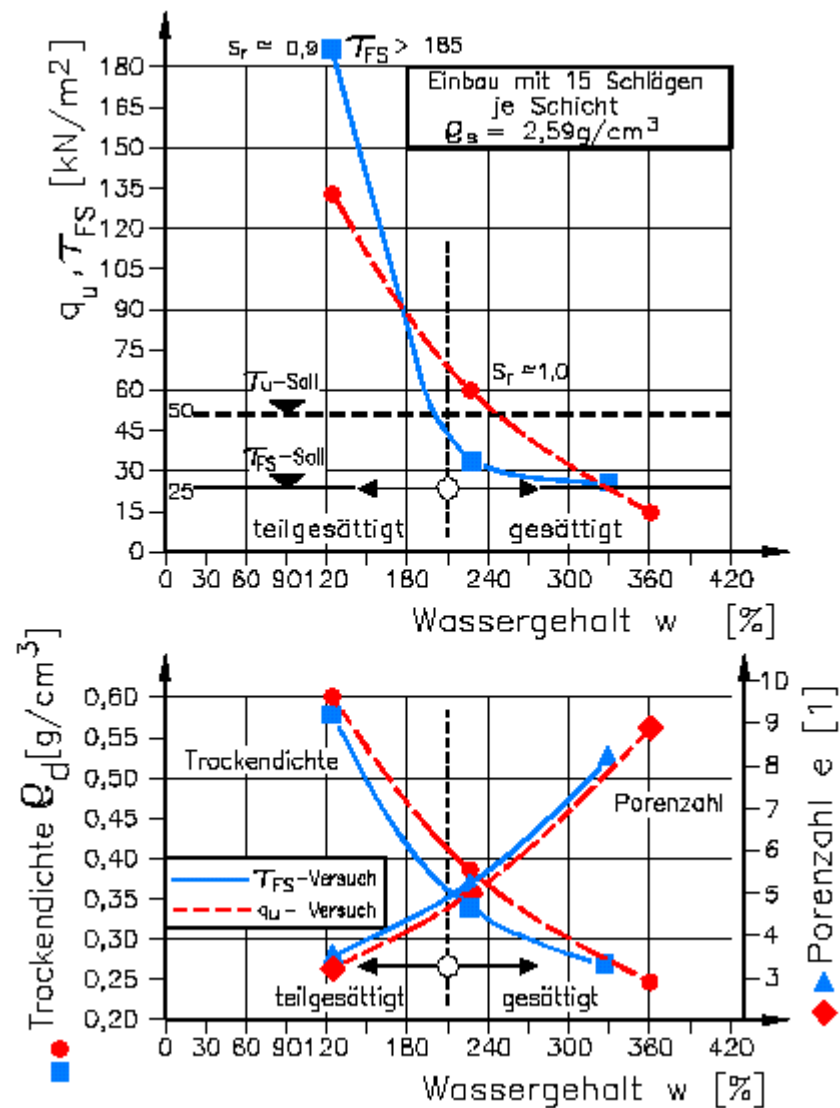


Abb. 6.3: Festigkeitswerte τ_{FS} , q_u sowie Trockendichte ρ_d und Porenzahl e in Abhängigkeit vom Wassergehalt w (Galvanikschlamm mit variablem Wassergehalt); Verdichtung mit 15 Schlägen je Schicht

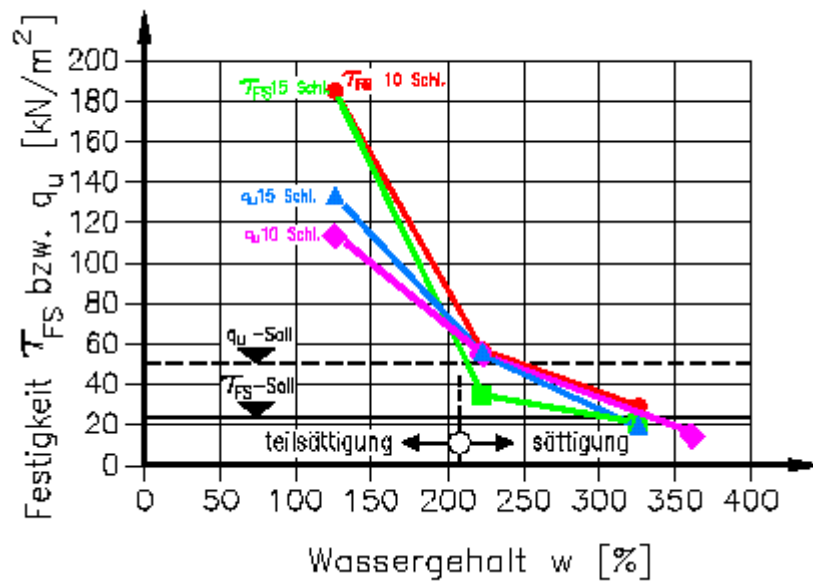


Abb. 6.4: Festigkeitsverlauf (τ_{FS} , q_u) in Abhängigkeit vom Wassergehalt w und der Verdichtungsarbeit (Galvanikschlamm mit variablem Wassergehalt)

Gipsschlamm (SER)

Abb. 6.5 zeigt zusammengefasst die an dem Gipsschlamm ermittelten Ergebnisse für den natürlichen Ausgangswassergehalt ($\sim 60\%$). Der Gipsschlamm liegt im nahezu gesättigt anzunehmenden Bereich ($S_r \geq 0,95$). Die ermittelten Festigkeiten liegen sowohl für τ_{FS} als auch q_u in einem sehr niedrigen Niveau. Die Zuordnungswerte der AbAbIV und der TA Abfall werden in beiden Fällen deutlich unterschritten. Die unterschiedlichen Schlagzahlen haben keinen deutlichen Einfluss auf die Festigkeitsentwicklung. Das Verhältnis τ_{FS}/q_u liegt jedoch mit ca. 0,35 unter dem theoretischen Sollwert von 0,5. Bei zusätzlicher Anwendung eines Korrekturbeiwertes μ (z.B. nach BJERRUM, s. Abschn. 4.3.2.1.2) würde sich der Verhältniswert noch weiter reduzieren. Die q_u -Werte für $\varnothing 50$ sind nahezu durchgängig etwas größer als die $q_{u(36)}$ -Werte, die Unterschiede liegen jedoch im Bereich natürlicher Streuungen von Einzelversuchen.

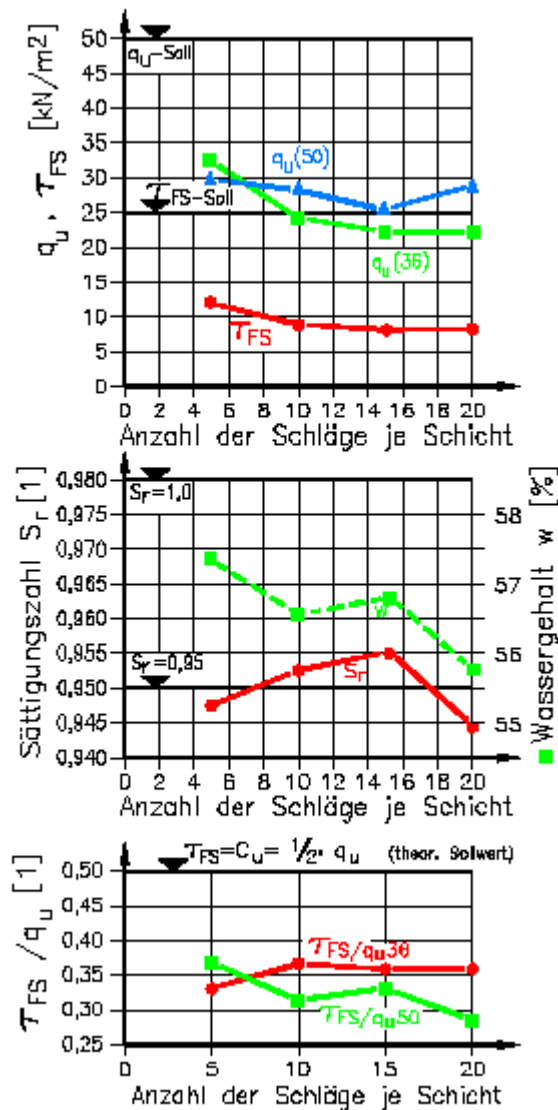


Abb. 6.5: Festigkeitsbeiwerte τ_{FS} und q_u sowie Sättigungsgrade S_r in Abhängigkeit von der Verdichtungsarbeit (Schlagzahl) (Gipsschlamm mit natürlichem Ausgangswassergehalt $w \sim 58\%$)

Abb. 6.6 zeigt die Festigkeitsverläufe für τ_{FS} und q_u für Proben, die mit in 2 Stufen reduzierten Wassergehalten (ca. 50 und 40 %) mit 10 bzw. 15 Schlägen verdichtet worden sind. Auch hier bestätigt sich der nach der Theorie zu erwartende Verlauf. Mit abnehmendem Ausgangswassergehalt steigen die Festigkeitswerte sehr stark an.

Der τ_{FS} -Sollwert wird bei einem Wassergehalt von ca. 50 %, der q_u -Sollwert bei ca. $w = 48 - 52$ % erreicht. Um diesen einzuhalten, müsste im konkreten Anwendungsfall eine Abtrocknung um mindestens 10 Wassergehalts-% vorgenommen werden.

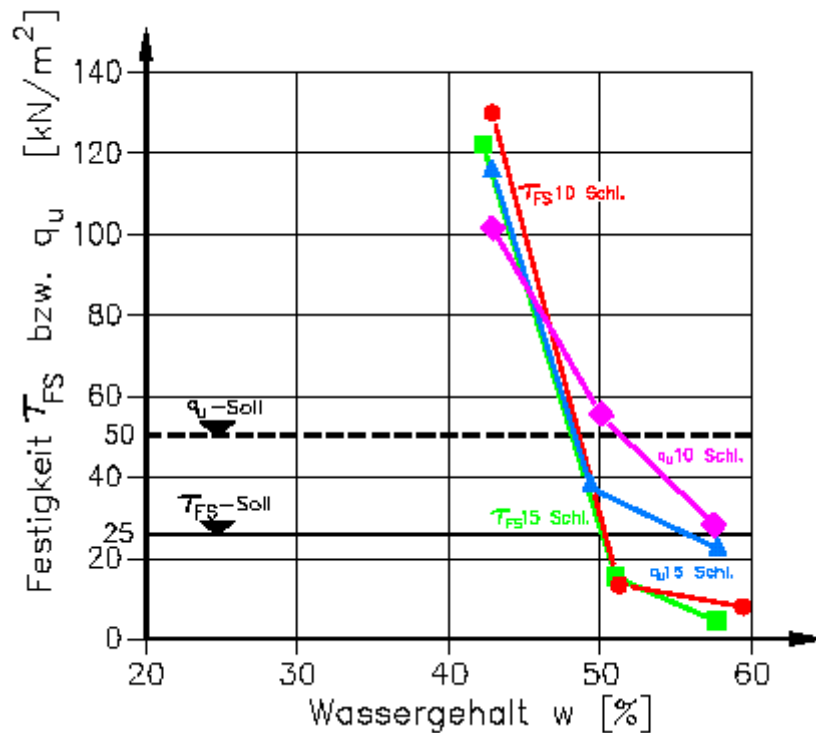


Abb. 6.6: Festigkeitswerte τ_{FS} und q_u in Abhängigkeit vom Ausgangswassergehalt und der Verdichtungsarbeit (10 u. 15 Schläge) (Gipsschlamm mit variablem Wassergehalt).

Abb. 6.7 zeigt im Detail die Abhängigkeit der Festigkeiten vom Sättigungsgrad. Oberhalb eines Sättigungsgrades S_r von ca. 95 % werden die Sollwerte für die Festigkeit unterschritten

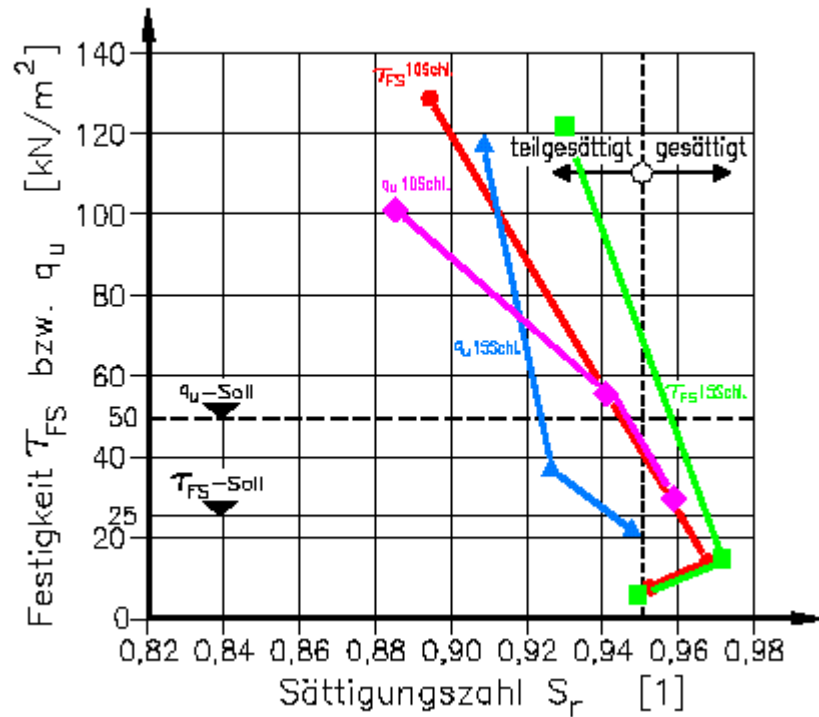


Abb. 6.7: Festigkeit in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad, der bei der eingetragenen Verdichtungsarbeit erreicht wird (Gipsschlamm).

An dem SER-Material wurde beispielhaft der Einfluss des Probenalters in Stunden nach Herstellung der Prüfkörper auf die Festigkeitsmessungen untersucht. Das Probenmaterial wurde mit dem Ausgangswassergehalt und 10 bzw. 20 Schlägen pro Einbaulage verdichtet. Die Lagerungszeit wurde zwischen 0 und 24 Stunden variiert. Abb. 6.8 zeigt zusammengefasst die Ergebnisse.

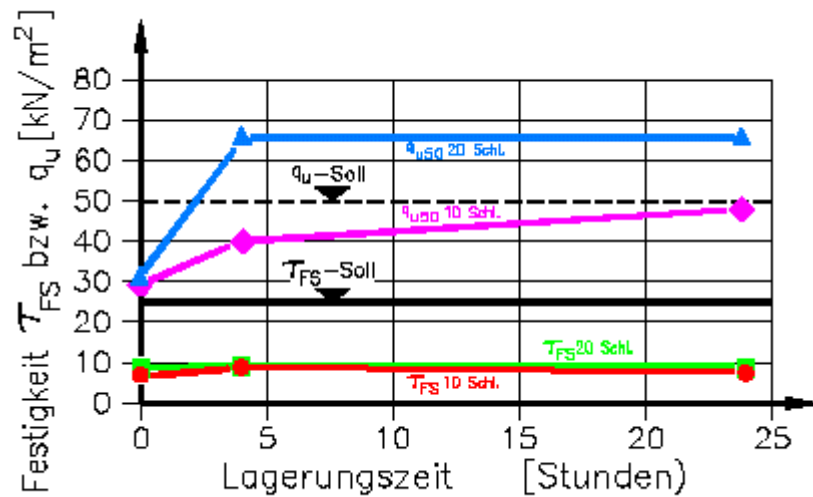


Abb. 6.8: Festigkeitswerte in Abhängigkeit von der Probenlagerungszeit. Gipsschlamm mit Ausgangswassergehalt ($w \sim 60\%$).

Die τ_{FS} -Werte liegen unabhängig vom Prüfzeitpunkt nach Probenherstellung und der Höhe der Verdichtungsarbeit in der gleichen Größenordnung und insgesamt in einem sehr niedrigen Niveau. Ein Unterschied in den Werten für 10 und 20 Schläge besteht quasi nicht.

Die q_u -Werte steigen dagegen zwischen 0 und 4 Stunden signifikant an. Die Veränderungen zwischen 4 und 24 Stunden sind wesentlich schwächer ausgeprägt. Die Druckfestigkeiten q_{u50} liegen nach 4 Stunden um den Faktor 1,4 (10 Schläge) bzw. 2,2 (20 Schläge) höher als die Referenzwerte nach 0 Stunden. Außerdem ist die Festigkeitszunahme bei den mit 20 Schlägen beaufschlagten Proben sehr viel stärker ausgeprägt als bei 10 Schlägen. Für $t = 0$ Stunden sind die Werte nahezu gleich (s.a. Abb. 6.7).

Die Verhältnismerte τ_{FS}/q_u liegen nach 0 Stunden zwischen 0,29 (10 Schläge) und 0,32 (20 Schläge), nach 4 Stunden zwischen 0,21 (10 Schläge) und 0,13 (20 Schläge). Die für den Gipsschlamm bereits unter dem theoretischen Sollwert von $\tau_{FS}/q_u = 0,5$ liegenden Verhältnismerte werden damit vor allem zeitabhängig noch deutlicher unterschritten.

Eisenoxidschlamm (ECE)

Der Eisenoxidschlamm (Abb. 6.9) wurde mit dem Ausgangswassergehalt $w \sim 25,5 \%$ und Schlagzahlen zwischen 5 und 20 je Einbaulage ($n = 3$) verdichtet. Infolge steigender Verdichtungsarbeit nimmt die Trockendichte von $\rho_d = 1.559 \text{ g/m}^3$ (5 Schläge) auf 1.734 g/cm^3 (20 Schläge) zu. Bezogen auf eine Proctordichte ρ_{Pr} von 1.793 g/cm^3 sind den Trockendichten Verdichtungsgrade von 87 bis 97 % der einfachen Proctordichte zuzuordnen.

Entsprechend der Zunahme der Trockendichte steigt auch der Sättigungsgrad mit zunehmender Schlagzahl von 0,68 auf 0,84 an. Das Material liegt im mit natürlichem Wassergehalt verdichteten Zustand nur im Bereich der Teilsättigung ($\ll 1,0$). Entsprechend den Erläuterungen und bodenphysikalischen Gesetzmäßigkeiten nach Abschn. 5.1.6 steigen die Festigkeiten im Bereich der Teilsättigung mit der Verdichtungsarbeit signifikant an.

Die q_u -Werte von Prüfkörpern mit 36 und 50 mm Durchmesser unterscheiden sich nicht wesentlich voneinander. Die Unterschiede liegen im Bereich natürlicher Materialstreuungen. Die Verhältniswerte τ_{FS}/q_u liegen mit Werten zwischen 1,0 und 2,0 jedoch deutlich über dem theoretischen Wert von $\tau_{FS}/q_u = 0,5$. Ein ähnliches Verhalten zeigt im Rahmen der vorliegenden Studie nur der Galvanikschlamm, der jedoch abweichend vom vorliegenden Fall im Bereich der Vollsättigung untersucht wurde (s.a. Abb. 6.1). Trotz dieser Diskrepanz werden im vorliegenden Beispiel der Teilsättigung die Zuordnungswerte der AbfAbIV und der TA Abfall selbst im Bereich kleiner Schlagzahlen = niedrige Verdichtungsarbeit erfüllt. Hier ist jedoch anzumerken, dass die gemessenen Festigkeiten tatsächlich Gesamtscherwiderstände sind, die wegen der Teilsättigung keine Aussage über die Anfangsfestigkeit (nicht entwässerte Bedingungen) zulassen.

Abb. 6.10 zeigt die Festigkeitsentwicklung eines gegenüber dem Ausgangszustand leicht angefeuchteten Materials. Die Schlagzahl bei Herstellung der Prüfkörper wurde einheitlich mit 10 gewählt.

In Abhängigkeit von der Wassergehaltszunahme nehmen die q_u - und τ_{FS} -Werte signifikant ab. Bei einer Befeuchtung um ca. 3 - 4 % unterschreiten die Werte q_u und τ_{FS} bereits die Mindestwerte der AbfAbIV und der TA Abfall. Darüber hinausgehend fällt die Festigkeit auf extrem niedrige Werte ab, das Material geht in den breiigen Zustand über. Die Druckfestigkeit war nicht mehr messbar, weil sich die Prüfkörper bereits unter Eigengewicht tonnenförmig deformierten.

Auch hier bestätigt sich - wie bereits bei den übrigen Schlämmen experimentell nachgewiesen - der theoretische Ansatz, wonach die Festigkeit bindiger Böden oder vergleichbarer Erdstoffe exponentiell

vom Wassergehalt abhängt. Eine Erhöhung des Wassergehaltes um einige % kann danach - material-spezifisch - ausreichen, um die Festigkeit um einige 100 % zu reduzieren. **Generell kann oberhalb eines Sättigungsgrades von ca. 95 % bei einem dynamisch verdichteten Material mit einer Unterschreitung der Mindestwerte nach AbAbIV und TA Abfall gerechnet werden.**

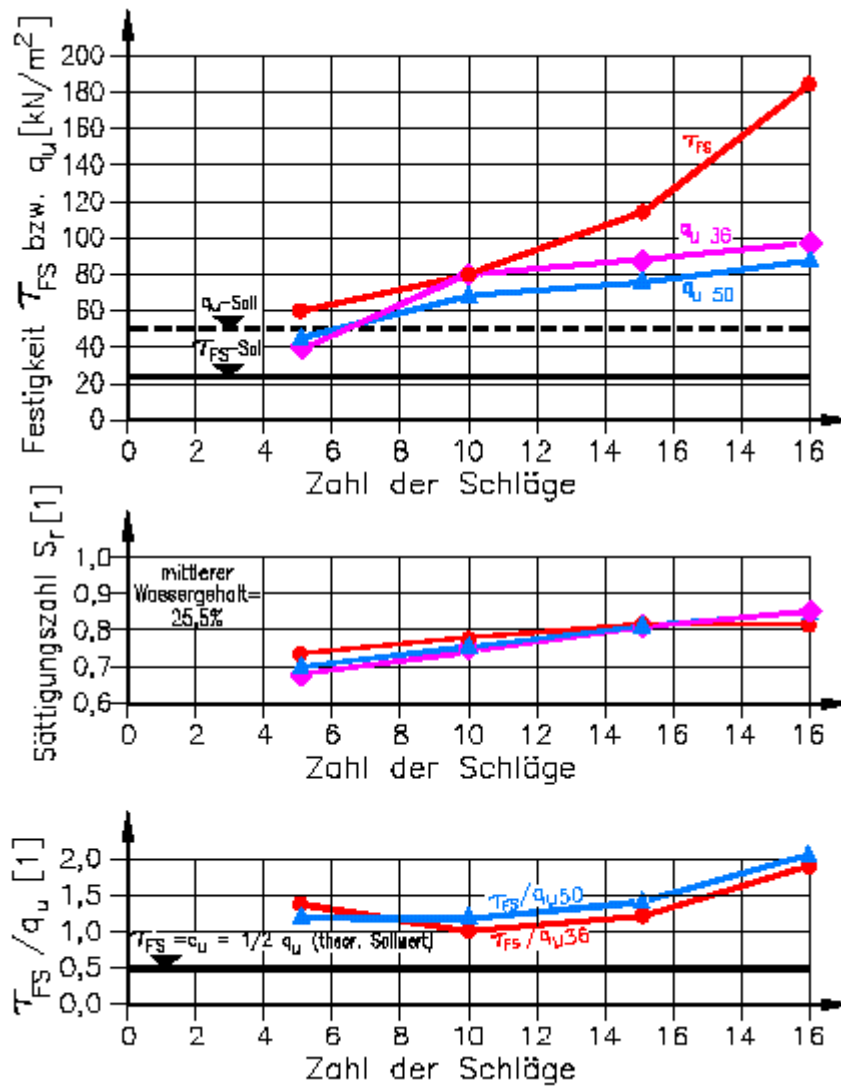


Abb. 6.9: Festigkeitsverlauf (τ_{FS} , q_u) und Sättigungszahlen (S_r) als Funktion der Verdichtungsarbeit (Verdichtungsschläge je Einbaulage) (Eisenoxidschlamm mit Ausgangswassergehalt; i. M. 25,5 %)

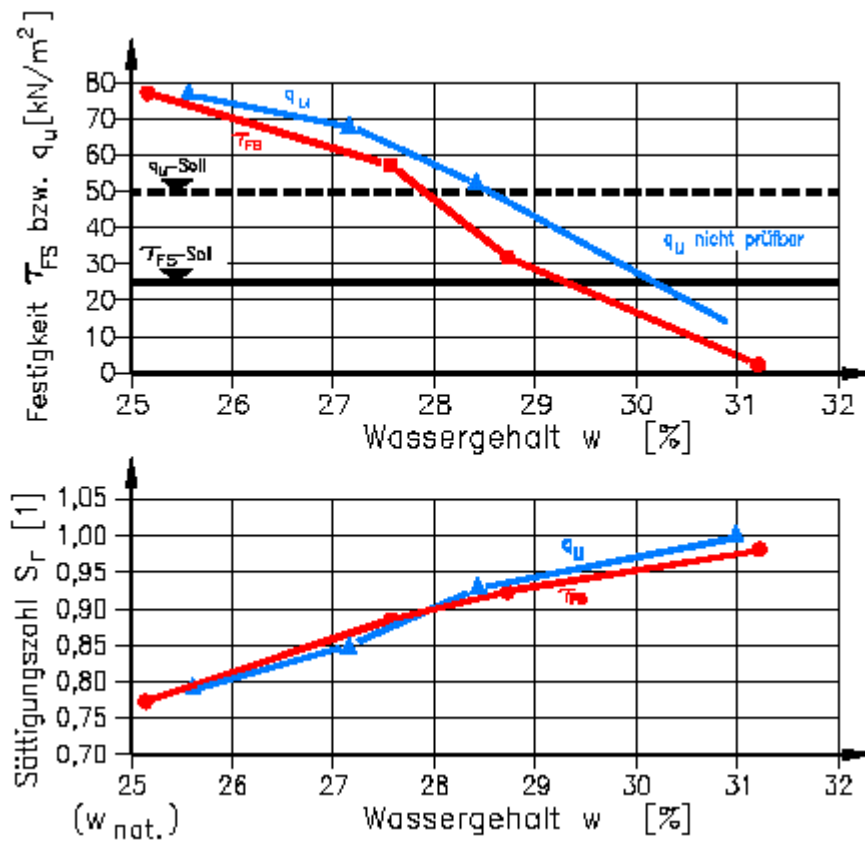


Abb. 6.10: Festigkeitsabfall von angefeuchteten Proben

(Schlagzahl $n = 10/\text{Lage}$) (Eisenoxidschlamm) ($w_{\text{natürlich}} = 25\%$)

Eisenhydroxidschlamm (EHS)

Abb. 6.11 zeigt zusammengefasst die Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen an mit 10 und 20 Schlägen verdichteten Schlammproben. Der Wassergehalt von ca. 110 % im Ausgangszustand wurde in 3 Stufen auf ca. 92 %, 78 % und 62 % heruntergetrocknet.

Auch das EHS-Material zeigt den zu erwartenden typischen Festigkeitsabfall mit steigendem Wassergehalt. Bei einem Wassergehalt um 62 % herum liegt nur Teilsättigung vor. In diesem Zustand wirkt sich eine höhere Schlagzahl noch verdichtungs- und damit festigkeitserhöhend für τ_{FS} und q_u aus. Mit Erhöhung des Wassergehaltes auf ca. 78 % kippt das System. Die höhere Verdichtungsarbeit (20 Schläge) führt bereits zu einer nahezu 100 %-igen Sättigung und zu einer deutlichen Festigkeitsabnahme, die Sollwerte der AbfAbIV und der TA Abfall werden knapp unterschritten. Im Vergleich dazu liegen die mit 10 Schlägen verdichteten Proben noch im Bereich der Teilsättigung ($S_r \sim 95\%$)

und in einem deutlich höheren Festigkeitsniveau. Erst bei einer weiteren Wassergehaltserhöhung fallen sowohl die τ_{FS} -Werte als auch die q_u -Werte auf ein sehr niedriges, unzulässiges Niveau ab. Die Verhältniswerte τ_{FS}/q_u liegen für 10 Schläge bei 0,4 und für 20 Schläge bei 0,47 und damit relativ nahe am theoretischen Sollwert von 0,5. Für niedrigere Wassergehalte kehrt sich das Verhältnis auf Werte $> 1,0$ um. Bereits dieser Sachverhalt deutet darauf hin, dass die theoretischen Grundlagen und die daraus abgeleiteten Ziel- und Prüfgrößen (c_u) nur im Bereich weitgehender Wassersättigung Gültigkeit haben.

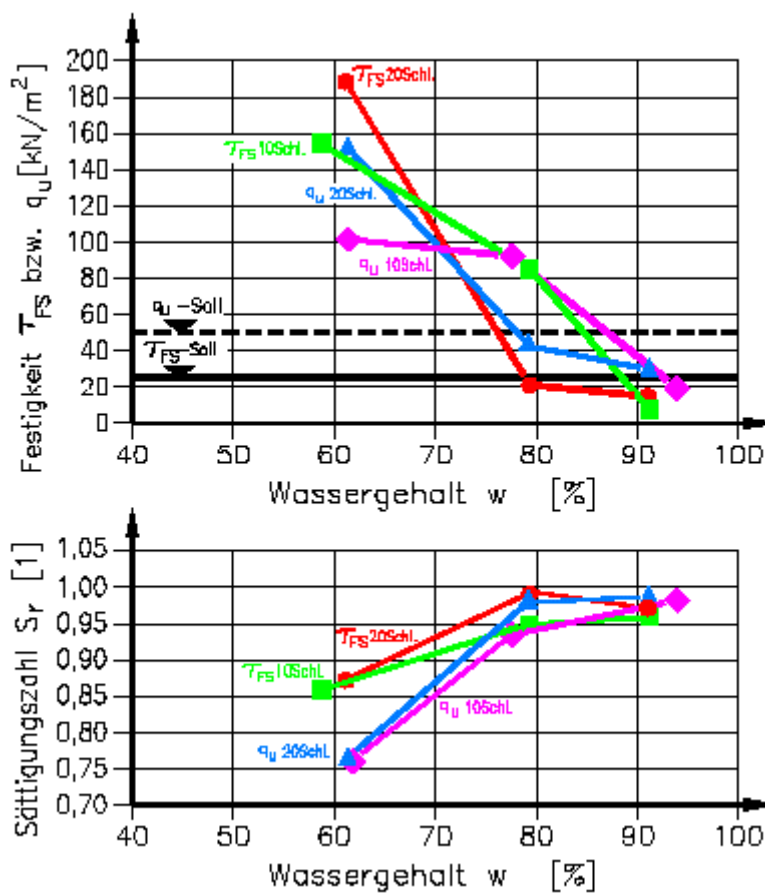


Abb. 6.11: Festigkeitsverlauf (τ_{FS} , q_u) und Sättigungsgrade in Abhängigkeit von der Verdichtungsarbeit (Eisenhydroxidschlamm mit variablem, reduziertem Wassergehalt, ($w_{nat.} \sim 120\%$))

Der Einfluss der **Belastungsgeschwindigkeit** auf die Prüfgröße q_u wurde in einer gesonderten Versuchsserie überprüft (Abb. 6.12). Der Proben- \varnothing wurde mit 36 und 50 mm festgelegt. Zusätzlich zu der Normgeschwindigkeit $v_a = 1\%$ der Probenhöhe/Minute nach DIN 18136 wurde die Geschwin-

digkeit auf 30 mm/min. gesteigert, dies entspricht gegenüber dem Normversuch einer Steigerung um den Faktor 33 ($\varnothing 36$ mm) bzw. 24. Die Versuchsergebnisse sind in Abb. 6.12 zusammen mit den bei 10 Schlägen/Einzellage in Abhängigkeit vom Einbauwassergehalt erzielten Trockendichten und Sättigungsgrade dargestellt.

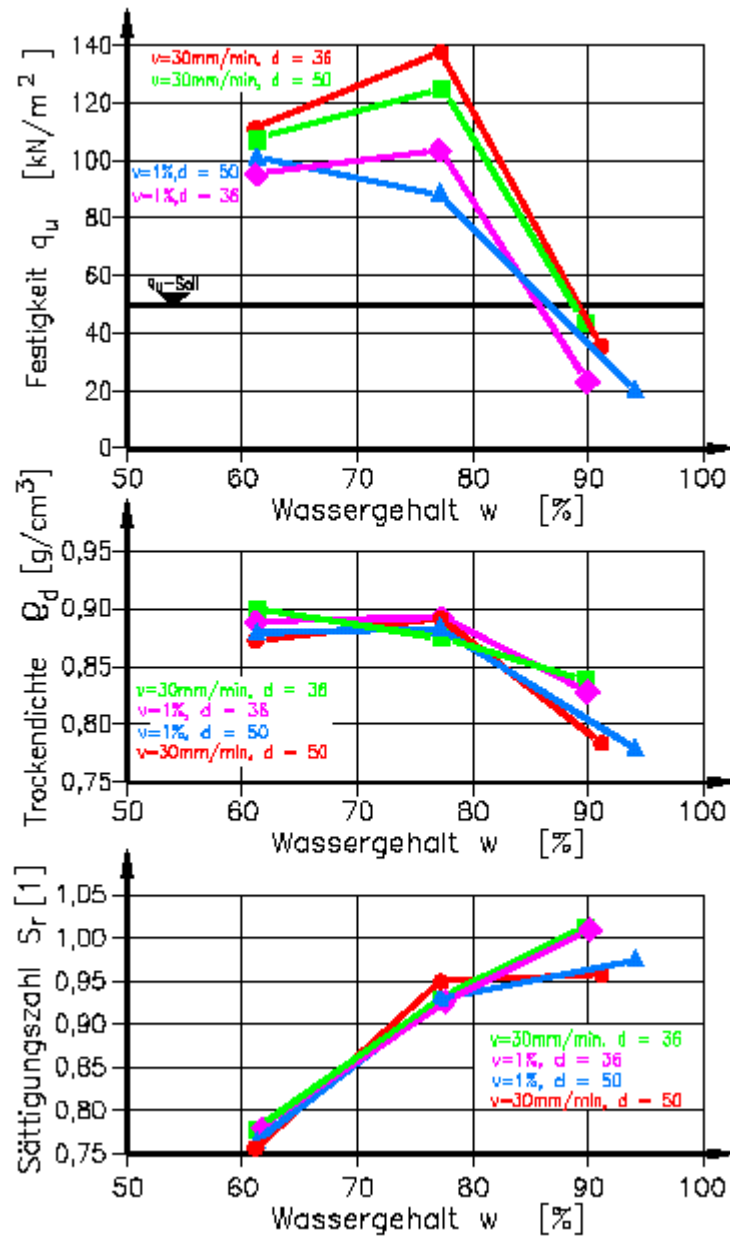


Abb. 6.12: Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die 1-axiale Druckfestigkeit (Eisenhydroxidschlamm)

Die Druckfestigkeiten nehmen bis zu einem Teilsättigungsgrad von $S_r \sim 95 \%$ i.d.R. noch leicht zu, darüber hinaus fallen die Festigkeitswerte wieder stark unter den q_u -Soll-Wert ab. Die Festigkeitsunterschiede der $\varnothing 36$ und $\varnothing 50$ mm Proben sind nicht auffallend und deuten keine Gesetzmäßigkeit an. Anders sind die Ergebnisse im Hinblick auf die Versuchsgeschwindigkeit zu deuten. Mit steigendem Sättigungsgrad bzw. Wassergehalt nehmen die q_u -Werte mit steigender Verformungsgeschwindigkeit zu. Im Bereich der Teilsättigung unterscheiden sich die q_u -Werte ($v = 30$ mm/min/ Normgeschwindigkeit) nur um den Faktor 1,05 - 1,1, bei $S_r \rightarrow 1,0$ ($w > 90 \%$) erhöht sich der Faktor auf 1,6 - 1,9. Auch dieses Ergebnis bestätigt die theoretischen Erwartungen (s. Abschn. 4.3.2.1.2).

In Abb. 6.13 sind die Ergebnisse von Flügelscherversuchen mit Variation der **Flügel-Drehgeschwindigkeit** zwischen $\dot{\gamma} = 10^\circ/\text{min}$ und $30^\circ/\text{min}$ dargestellt. $\dot{\gamma} = 10^\circ/\text{min}$ entspricht der Normgeschwindigkeit. Zusätzlich werden die Flügelabmessungen mit $d : h = 1 : 1$ und $d : h = 1 : 2$ variiert. Für den relativ trockenen Schlamm ($w \sim 62 \%$) sind die Messwerte wenig aussagefähig, weil bei 3 von 4 Messwerten die obere Grenze des Messbereiches überschritten wurde. Gegenüber der Eintragung in Abb. 6.13 liegen die tatsächlichen Festigkeiten noch höher.

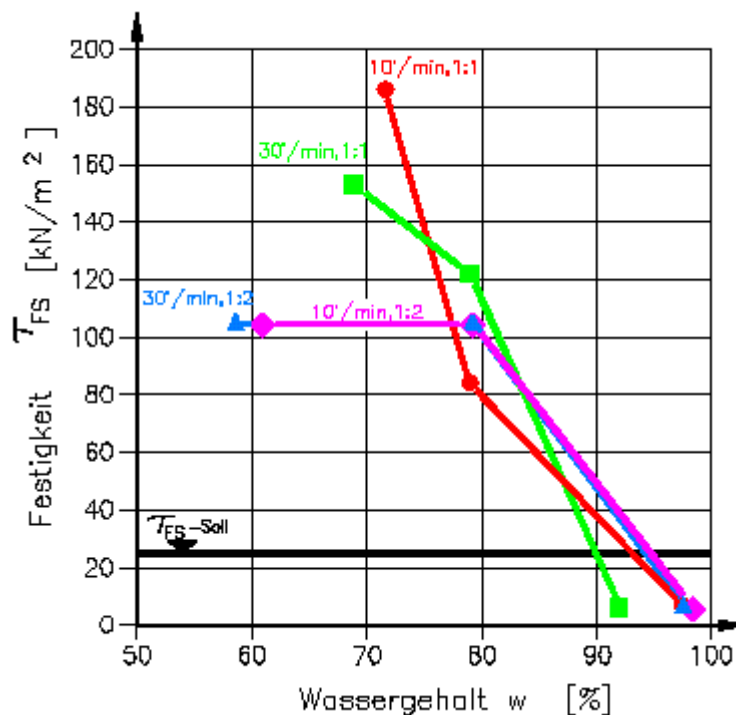


Abb. 6.13: Einfluss der Drehgeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ und der Flügelabmessungen ($d/h = 1 : 1$ u. $1 : 2$) auf die Flügelscherfestigkeit (Eisenhydroxidschlamm)

Nimmt man die Werte für weitgehende Wassersättigung (s.a. Abb. 6.12) ergeben sich im Bereich der gewählten Geschwindigkeitsänderung auch für unterschiedliche Flügelabmessungen keine signifikanten Unterschiede. Wie bereits bei den q_u -Versuchen wird der Mindestwert nach AbfAbIV und TA Abfall von 25 kN/m^2 deutlich unterschritten.

Glauberit

Für die Ermittlung von τ_{FS} und q_u wurden Prüfkörper mit unterschiedlicher Verdichtungsarbeit hergestellt. Bei generell 3-lagigem Einbau wurden die Schlagzahlen wie folgt variiert: 10 Schläge, 15 Schläge, 25 Schläge (analog Proctorversuch). Es ergeben sich die in Abb. 6.14 eingetragenen Mittelwerte und Streubereiche. Die Stichprobengröße lag einheitlich bei $n = 3$.

Die Trockendichte ρ_d des Materials sowie die Festigkeitswerte steigen gleichsinnig mit der Schlagarbeit an. Die τ_{FS} -Werte liegen für 10 bzw. 25 Schläge zwischen ca. 46 und 66 kN/m^2 . Der Zuordnungswert nach AbfAbIV und nach TA Abfall wird danach formal sicher eingehalten.

Generell ist auch bei den q_u -Werten der $\varnothing 50 \text{ mm}$ Proben eine Erhöhung mit zunehmender Schlagzahl erkennbar. Die q_u -Werte liegen aber sehr niedrig zwischen 22 und 40 kN/m^2 und würden somit - wenn man sie unkritisch der Beurteilung zugrunde legen würde - die Mindestanforderungen ($q_u \geq 50 \text{ kN/m}^2$) nicht erfüllen.

Die aus τ_{FS} und q_u berechenbaren Verhältniswerte liegen zwischen 2,1 (10 Schläge) und 1,65 (25 Schläge).

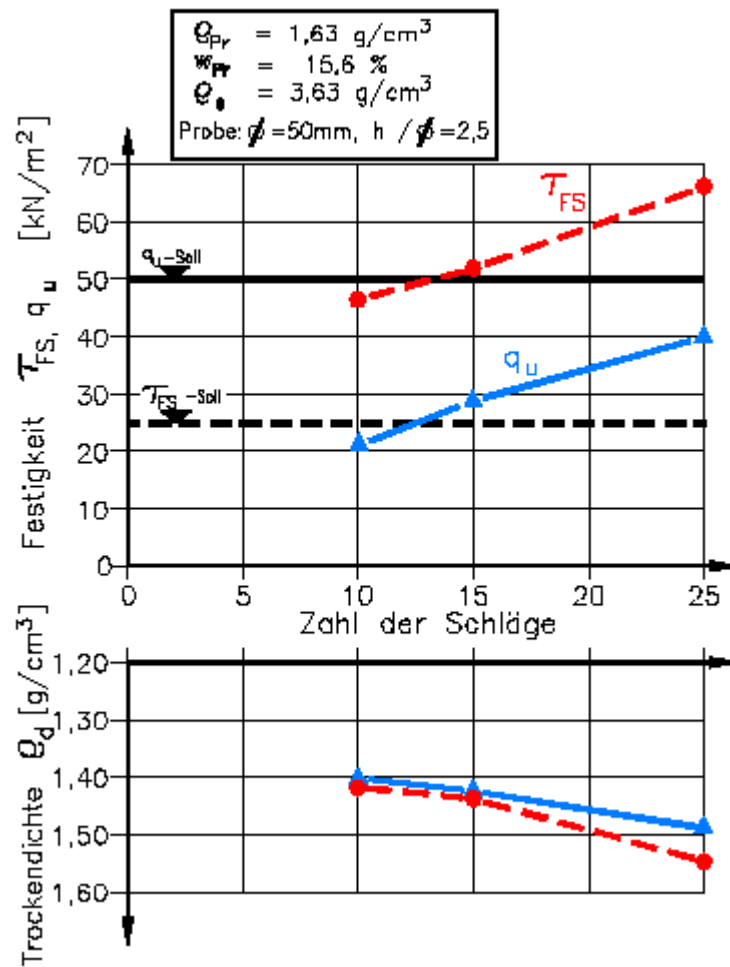


Abb. 6.14: Festigkeit (τ_{FS} , q_u) in Abhängigkeit von der Verdichtungsarbeit bzw. Schlagzahl (Glauberit) - natürlicher Wassergehalt $w \sim 5,5 \%$

Die Ergebnisse verdeutlichen folgende Zusammenhänge:

- Der Flügelscherversuch erfüllt die Zuordnungswerte, der einaxiale Druckversuch erfüllt sie nicht.
- Für teilgesättigte Bedingungen ($S_r \ll 1,0$) gilt die theoretische Zuordnung: $q_u = 2 \cdot c_u$ nicht. Es werden letztlich Gesamtscherfestigkeiten gemessen, die sogar zu einer Umkehrung des Verhältniswertes τ_{FS}/q_u führen können. Die niedrigen q_u -Werte trotz anzunehmender hoher Gesamtscherfestigkeit werden nur deshalb gemessen, weil die bei diesem schwach bindigen Bo-

den nur relativ niedrige wirksame Kohäsion c' einen seitlich nicht gestützten Prüfkörper (im Gegensatz zum Flügel-Scherversuch) nicht ausreichend stabilisieren kann, um einen dem Verdichtungszustand entsprechenden Festigkeitswert q_u zu messen. Im Extremfall $c' \rightarrow 0$ würde der Prüfkörper trotz hoher Verdichtung keine Last aufnehmen ($q_u \rightarrow 0$), obwohl mit der Flügelsonde hohe Messwerte ermittelt werden können.

- Die Verdichtungsarbeit beeinflusst bei Teilsättigung signifikant die Einbaudichte und den gemessenen Scherwiderstand.

Gips aus Baycrom

Die angelieferte Probe liegt auf dem nassen Ast der zugeordneten Proctorkurve. Bei einer Verdichtung wird sehr schnell eine Annäherung an die Sättigungslinie ($S_r \rightarrow 1,0$) erreicht und das Material geht in den breiig-weichen Zustand über.

Die Verdichtung erfolgte bei dem Ausgangswassergehalt von 43,4 % nur mit 10 Schlägen/Einbaulage. Bei höherer Verdichtungsarbeit trat Wasser aus. Mit dem natürlichen Wassergehalt war kein standfester Prüfkörper für Druckversuche herstellbar.

Um die Wassergehaltsabhängigkeit der Prüfgrößen q_u und c_u zu verdeutlichen, wurde für die Folgeuntersuchungen das Material geringfügig abgetrocknet (37,9 %) und einheitlich mit 25 Schlägen (analog Proctor) verdichtet ($S_r \sim 0,9$). Variiert wurde jeweils nur der Prüfzeitpunkt (unmittelbar nach Herstellung des Prüfkörpers und 2 Stunden nach der Verdichtung).

Alle Ergebnisse sind in Abb. 6.15 zusammengestellt worden.

Für den Ausgangswassergehalt liegen die τ_{FS} -Werte in einem sehr niedrigen Niveau ($\tau_{FS} < 3 \text{ kN/m}^2$). Das vor der Verdichtung eher pulverig und leicht feucht anzusprechende Material geht nach Eintrag der Schlagarbeit in einen weich-breiigen Zustand über.

Nach einer Abtrocknung um ca. 5,5 % und Prüfung unmittelbar nach Prüfkörperherstellung ($t = 0$) erhöhen sich die τ_{FS} -Werte auf i.M. 60 kN/m^2 und die q_u -Werte auf i.M. 115 kN/m^2 .

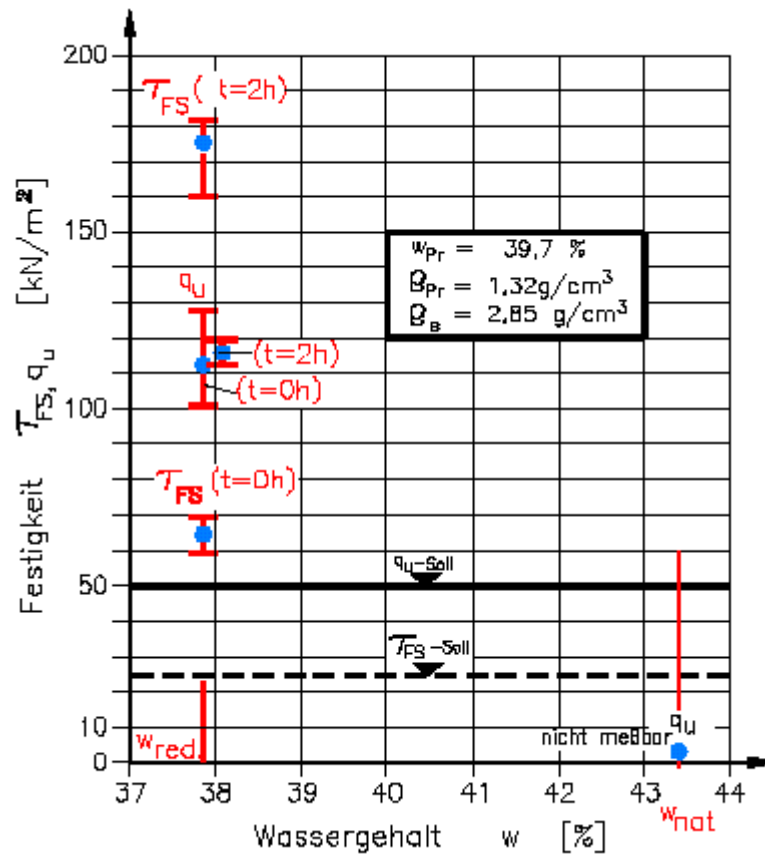


Abb. 6.15: Festigkeiten (τ_{FS} , q_u) in Abhängigkeit vom Wassergehalt und vom Prüfzeitpunkt (10 Schläge/Lage) (Gips aus Baycrom F)

Bei einer Prüfung 2 Stunden nach Prüfkörperherstellung bleiben die q_u -Werte nahezu konstant, die τ_{FS} -Werte erhöhen sich jedoch i.M. um den Faktor 2,7 auf ca. 175 kN/m². Im Vergleich zum Gipschlamm nach Abb. 6.8 ergeben sich damit umgekehrte Verhältnisse, d.h. es existiert keine allgemein gültige Gesetzmäßigkeit. Die durch die mechanische Bearbeitung (Schlagverdichtung) eintretende starke Verminderung der undränierten Kohäsion (s.a. Abschn. 4.3.2.1.3) und der Effekt der zurückgewonnenen Festigkeit mit der Zeit (Thixotropie) ist materialspezifisch unterschiedlich und wirkt sich nach den vorliegenden Untersuchungsergebnissen aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen offensichtlich auch unterschiedlich auf die Prüfgrößen τ_{FS} und q_u aus.

Aus den Messergebnissen kann gefolgert werden:

- Die Zielgrößen q_u und c_u reagieren sehr empfindlich auf Wassergehaltsänderungen. Eine Reduzierung vom nassen Bereich in die Nähe des optimalen Wassergehaltes lässt die Festigkeit signifikant ansteigen. Diese Gesetzmäßigkeit gilt natürlich auch in umgekehrter Richtung.
- Bei der Flügelscherfestigkeits-Ermittlung scheint der Zeitpunkt der Prüfung eine nicht vernachlässigbare Rolle zu spielen. Der Einfluss auf q_u ist eher vernachlässigbar.
- Im natürlichen Feuchtezustand erfüllen verdichtete Proben die Zuordnungskriterien der AbfAbIV und der TA Abfall nicht. Es ist eine Abtrocknung erforderlich. Als Anhaltspunkt gilt wieder, dass ausreichende Festigkeiten erst unterhalb eines Sättigungsgrades S_r von 0,95 erwartet werden können.

7 Schlussfolgerungen und Anwendungsgrenzen

Unter Bezug auf die boden- und abfallmechanischen Grundlagen (Abschn. 4), versuchstechnischen Grundlagen (Abschn. 5) und die Untersuchungsergebnisse nach Abschn. 6 ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Die nicht entwässerte Kohäsion c_u (τ_{FS}) bzw. die einaxiale Druckfestigkeit q_u beschreiben die Anfangsscherfestigkeit nur für weitgehend wassergesättigte, normalkonsolidierte, feinkörnige Erdstoffe und vergleichbare Abfallstoffe.
- Weitgehende Wassersättigung kann erst ab einem Sättigungsgrad $S_r > 0,95$ erwartet werden. In diesem Fall sind mindestens 95 % des Porenraums n mit Wasser gefüllt.
- Bindig im Sinne der DIN 18196 sind Böden oder Abfälle zu bezeichnen, die einen Feinkornanteil ($< 0,06$ mm) ≥ 40 Massen-% aufweisen.
- Für nicht bindige, rollige Bodenarten und damit vergleichbare Abfälle lässt sich die Anfangsscherfestigkeit und damit der Anfangsgrenzzustand nicht definieren. Somit haben die Parame-

ter c_u und q_u keine Aussagekraft. Die Festigkeit (Tragfähigkeit und Scherfestigkeit) wird bei diesem Material nicht vom Wassergehalt sondern nahezu ausschließlich von der Lagerungsdichte gesteuert.

- Die in der AbfAbIV und der TA Abfall vorgegebenen Zuordnungswerte für c_u und q_u von 25 bzw. 50 kN/m² charakterisieren im boden- und abfallmechanischem Sinn den Übergang von der weichen zur steifen Zustandsform. Die mit der 1-axialen Druckfestigkeit nachzuweisende axiale Verformung $\varepsilon \leq 20\%$ stellt kein eigenständiges Prüfkriterium dar. Einaxiale Druckfestigkeit und axiale Verformung ε gehören inhaltlich zusammen und werden in einem Versuch bestimmt. Bei nicht ausgeprägtem Bruchpunkt wird die 1-axiale Druckspannung bei $\varepsilon = 20\%$ als 1-axiale Druckfestigkeit definiert ($q_u = \sigma_{0,2}$).
- Die in der AbfAbIV und der TA Abfall ausgewiesenen Zahlenwerte (s. Tabelle 2.1) sind als untere zulässige Festigkeitsgrenzen (Mindestwerte) für die oberirdische Ablagerung von Abfällen definiert. Sie sagen nichts aus über die tatsächlich zu fordernden Werte, die sich ausschließlich auf der Grundlage von statischen Nachweisen für die Stabilität des Deponiekörpers ergeben. Mit Stabilität ist dabei gemeint, dass sowohl im Betrieb als auch im Endzustand keine kritischen Verformungs- und/oder Bruchzustände auftreten dürfen, die die Gebrauchstauglichkeit des Systems einschränken. Art und Umfang der statischen Nachweise einschließlich Sicherheitskonzept und die hierfür erforderlichen Parameter orientieren sich maßgebend am jeweiligen Deponie- und Betriebskonzept. Die für diese Stabilitätsnachweise erforderlichen Parameter lassen sich nicht nur an τ_{FS} , c_u und/oder q_u -Werten festmachen und können im Einzelfall umfassendere geotechnische Prüfungen beinhalten. Hierzu gehört auch die evtl. Berücksichtigung der Fließeigenschaften nach Abschn. 2. Somit reduzieren sich die Vorgaben nach AbfAbIV und TA Abfall auf Prüfgrößen, die als Indexparameter zur Beschreibung der Festigkeit im Sinne von "Konsistenz" (Zustandsform) verstanden werden können. Bei Unterschreitung der Prüfwerte sind Schlämme mit üblichen Geräten i.d.R. nicht mehr befahr- und einbaubar.
- Aus dem Gesagten folgt, dass die gezielte Überprüfung von $c_u(\tau_{FS})$ - und/oder q_u -Werten sich nur auf solche Materialien beschränkt, die im Sinne der DIN 18196 als feinkörnig und im Anlieferungszustand oder im Zustand definierter Verdichtung als weitgehend wassergesättigt ($S_r > 0,95$) anzusprechen sind. Die in der Praxis häufig erhobene Forderung, diese Parameter

auch bei nicht bindigen Böden zu bestimmen, ist nicht zu begründen, noch weniger zu erfüllen.

- Die Kenngrößen c_u (τ_{FS}) und q_u sind in ihrem Anwendungs- bzw. Gültigkeitsbereich ($S_r > 0,95$) keine Materialkonstanten, sondern sie hängen exponentiell vom Wassergehalt und damit von der effektiven Normalspannung bzw. äquivalenten Spannung σ_e ab, unter der der Boden vorher konsolidiert wurde.
- Bei schlagverdichteten Proben im Proctorversuch für die Deklaration und Eingangskontrolle liegen bei weitgehender Wassersättigung die c_u - und q_u -Werte überwiegend unabhängig von der Verdichtungsarbeit (Schlagzahl) in einem nahezu gleichbleibenden Niveau. Ursache hierfür ist, dass die Erhöhung der Schlagenergie bei einer Annäherung an die Sättigungslinie entsprechend der Proctor-Charakteristik nahezu vollständig vom Porenwasserdruck abgefedert wird und der Energieeintrag keine Reduzierung der Porenzahl e bzw. des Porenanteils n und damit einhergehend eine Erhöhung der Lagerungsdichte bewirkt. Die Erhöhung der Schlagenergie kann allenfalls - dann aber materialspezifisch und nicht allgemeingültig - zu einer Strukturveränderung (z.B. Änderung der Anordnung der Moleküle in den Adsorptionshüllen) führen, die sich wiederum auf die τ_{FS} - und q_u -Werte reduzierend auswirken kann.
- Bei hohen Ausgangswassergehalten, die infolge Schlagverdichtung im Proctorversuch oder aber auch durch dynamische Erregung im Baufeld das Material in einen Zustand weitgehender Wassersättigung überführen ($S_r > 0,95$) ist i.d.R. mit τ_{FS} - und q_u -Werten zu rechnen, die die Mindestwerte von 25 bzw. 50 kN/m² unterschreiten.
- Im teilgesättigten Bereich ($S_r < 0,95$) ist mit den üblichen Messverfahren nur noch die Gesamtscherfestigkeit ($c_u, \phi_u, \neq 0$) zu ermitteln, eine Trennung in einen Kohäsions- und Reibungsanteil ist nicht möglich. In diesem Bereich nehmen die Gesamtscherfestigkeit und damit die im τ_{FS} - und q_u -Versuch gemessenen "Widerstände" noch signifikant mit der Verdichtungsarbeit (Schlagzahl) oder der Vorbelastung zu. In diesem teilgesättigten Bereich ist selbst für eine Verdichtungsarbeit deutlich kleiner als die Arbeit im Proctorversuch ($A = 0,6 \text{ MN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$), z.B. bei nur 10 statt 25 Schlägen/Lage, dagegen mit einer Einhaltung der Zuordnungswerte nach AbfAbIV und TA Abfall zu rechnen.

- Entsprechend der Theorie nehmen die Festigkeitsgrößen τ_{FS} und q_u unter weitgehend gesättigten Bedingungen mit der Belastungsgeschwindigkeit bzw. Schergeschwindigkeit zu. In den q_u -Versuchen mit gegenüber dem Normversuch um den Faktor 30 höheren Belastungsgeschwindigkeit lag die gemessene Festigkeit beispielsweise um bis zu 1,6 - 1,9-fach höher. Im Bereich der Teilsättigung waren die Unterschiede dagegen vernachlässigbar.

Im Flügelscherversuch waren bei gegenüber dem Normalversuch nur 3-fach höheren Drehgeschwindigkeit keine signifikanten Unterschiede messbar. Höhere Geschwindigkeiten waren gerätebedingt nicht einstellbar. Hierfür wären Sonderkonstruktionen erforderlich.

- Der Thixotropieeffekt nach Energieeintrag in eine weitgehend wassergesättigte Boden- bzw. Schlammprobe wirkt sich - materialspezifisch und damit nicht allgemeingültig - auf die Kenngrößen τ_{FS} und q_u unterschiedlich aus. Bei dem Gipsschlamm lagen in Abhängigkeit von der verwendeten Schlagzahl ($n = 10$ und 20 Schläge/je Lage) die q_u -Werte ($t = 4$ Stunden nach Herstellung) um bis zu 220 % über den entsprechenden Vergleichswerten ($t = 0$ Stunden). Die τ_{FS} -Werte zeigten dagegen keinen Zeiteinfluss. Umgekehrt verhielten sich die τ_{FS} - und q_u -Werte des Eisenhydroxidschlammes. Hier nahmen die τ_{FS} -Werte zwischen $t = 0$ und 2 Stunden um mehr als 200 % zu, während die q_u -Werte in der gleichen Größenordnung verblieben.
- Der theoretische Sollwert c_u (τ_{FS}) q_u von 0,5 wird in den Versuchen nur in Einzelfällen bestätigt. Er schwankt in sehr weiten Grenzen zwischen 0,2 und 2,0, d.h. er wird sowohl unterschritten als auch deutlich überschritten. Überschreitungen sind vor allem im teilgesättigten Bereich gegeben ($S_r < 0,95$), wo die τ_{FS} -Werte überproportional ansteigen. Im gesättigten Bereich liegen mit Ausnahme des Galvanikschlammes die Verhältniswerte im Bereich $< 0,5$ vor, d.h. bei hoher Sättigung wird eher die Flügelscherfestigkeit im Verhältnis zu den q_u -Werten unterbestimmt. Eine Umrechnung von c_u - bzw. τ_{FS} -Werten in q_u -Werte und umgekehrt ist damit über feste Faktoren nicht möglich, sondern muss unter Berücksichtigung der jeweiligen Versuchsbedingungen für das Einzelmaterial festgelegt werden.

Zusammengefasst lässt sich folgern:

Flügelsondierungen und einaxiale Druckversuche ergeben die Gesamtscherfestigkeit des undränierten Bodens oder Abfalls bei schnellem Abscheren. Ihre Aufteilung in die Scherparameter Reibung und Kohäsion ist nicht möglich. Eine Verwendung der gemessenen Scherfestigkeit ist nur für die

erdstatischen Berechnungen möglich, bei denen die Scherfestigkeit des undrännierten Bodens oder Abfalls maßgebend ist, wobei der Reibungswinkel gleich Null gesetzt wird. Dies ist bei undrännerten, weitgehend wassergesättigten bindigen, feinkörnigen Böden oder vergleichbaren Abfallstoffen der Fall. Nur für diese Bedingungen ist auch die Beziehung $\tau_{FS} = c_u = q_u/2$ gültig.

Für nichtbindige Bodenarten oder damit vergleichbare Abfälle haben die Parameter τ_{FS} und q_u bzw. c_u keine Aussagekraft. Aufgrund der guten Entwässerbarkeit lässt sich der Anfangsgrenzzustand ($\varphi_u = 0$, c_u) nicht definieren. Damit hat auch die Beziehung $\tau_{FS} = c_u = q_u/2$ keine theoretische und praktische Grundlage. Die Festigkeit (Trag- und Scherfestigkeit) wird bei diesen Materialien nicht vom Wassergehalt sondern ausschließlich von der Lagerungsdichte gesteuert.

Neben den genannten, aus der Boden- bzw. Abfallmechanik resultierenden Abhängigkeiten und Gesetzmäßigkeiten können zusätzlich auch arbeits- und versuchstechnische Einflüsse Auswirkungen auf die Zielgrößen τ_{FS} bzw. q_u (c_u) haben.

8 Handlungsempfehlung, Prüfvorschrift

8.1 Probennahme

Die Probennahme ist gemäß den Technischen Regeln der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) PN 2/78 und PN 2/78K durchzuführen. Ergänzungen und Vereinfachungen hierzu sind im Anhang 4 der AbfAbfV und Anhang B der TA Abfall enthalten.

8.2 Prüferfordernis

Die abzulagernden Abfälle sind gemäß DIN 4022, Teil 1 zu benennen und zu beschreiben sowie gemäß dem Klassifikationsschema nach DIN 18 196 einzugruppieren. Die labormäßige Ermittlung der Kornverteilung ist hierfür i.d.R. nicht erforderlich. Dabei gilt nach Erfahrungswerten folgende Prüferfordernis:

a) *Zu untersuchende Abfälle:*

- Feinkörnige, bindige Abfälle (Anteil Korn- $\emptyset \leq 0,06$ mm: ≥ 40 %).

- Gemischtkörnige Abfälle, bei denen noch kein Stützkorngerüst der jeweils grobkörnigen Fraktionen ausgebildet ist. Die feinkörnige Bodenmatrix bestimmt das mechanische Verhalten. (Anteil Korn- $\varnothing \leq 0,06$ mm: 15 bis 40 %, Anteil Korn- $\varnothing > 2,0$ mm: ≤ 40 %).

b) Nicht zu untersuchende Abfälle:

- Grobkörnige, nicht bindige Abfälle (Sand- und/oder Kieskorn, Korn- $\varnothing \leq 0,06$ mm: < 5 %).
- Gemischtkörnige Abfälle, bei denen ein Stützkorngerüst durch die jeweils grobkörnige Fraktion ausgebildet ist (Anteil Korn- $\varnothing \leq 0,06$ mm ≤ 15 %).
- Faserige Abfälle und i.d.R. MBA-Output mit im Vergleich zu den Prüfkörperabmessungen ungünstiger Aggregatgrößenverteilung.

Die angegebenen Massenanteile für die Abgrenzung gemischtkörniger Abfälle sind als Richtwerte zu verstehen. Der Übergang vom bindigen zu nichtbindigem Verhalten eines Abfalls ist nicht als Grenzzustand anzusehen sondern es besteht ein fließender Übergang.

8.3 Versuchsdurchführung

8.3.1 Allgemeines

Die Festigkeit kann entweder im Flügelsonden-Versuch oder im einaxialen Druckversuch ermittelt werden. Voraussetzung für die Bestimmung der Flügelscherfestigkeit τ_{FS} sowie der Einaxialen Druckfestigkeit q_u sind gleichmäßige Bedingungen bei der Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung zur Erzielung reproduzierbarer und vergleichbarer Ergebnisse.

8.3.2.1 Manuelle Aufbereitung

Das Prüfgut wird durch Kneten von Hand unter Beachtung der Sicherheitsbestimmungen (s.a. Abschn. 8.1 und 8.9) auf eine Teilchen- bzw. Aggregatgröße von 1/10 des Probekörperdurchmessers zerkleinert bzw. entsprechendes Überkorn (z.B. bei Gemischtkörnigen Abfäl-

len) abgetrennt. Bei leicht verfestigten Schlämmen kann mit einem Stahllineal durch hackende Bewegungen mit der scharfkantigen Seite die Zerkleinerung durchgeführt werden. Vor der Prüfkörperherstellung ist das zerkleinerte Material zu durchmischen.

8.3.2.2 Maschinelle Aufbereitung

In Sonderfällen kann die maschinelle Aufbereitung des Prüfgutes mittels eines Rührgerätes erforderlich sein. Hierzu wird das Probenmaterial in einem handelsüblichen Rührgerät („Mörtelmischer“, Inhalt 5 Liter) mit Hilfe von Knethaken und ggf. einem zusätzlichen Flachrührer 1 Minute lang gerührt. Der Rührkessel darf maximal bis zu 50 % befüllt werden.

Zur Dokumentation sind die Angaben zum verwendeten Rührgerät (Leistungsklasse), Umdrehungszahl oder Leistungsstufe, Rührwerkzeug (Knethaken, Flachrührer) und Rührzeit anzugeben.

8.4 Prüfkörperherstellung

8.4.1 Allgemeines

Für die Durchführung von Flügelscherversuchen und Einaxialen Druckversuchen ist die Herstellung von Prüfkörpern erforderlich. Die Herstellung erfolgt mit dem nach Abschn. 8.3.3.2 aufbereiteten Material.

8.4.2 Flügelscherversuch

Die Herstellung des Prüfkörpers erfolgt im Standard-Proctortopf ($d_i = 100$ mm, $h = 120$ mm). Die Verdichtung erfolgt in 3 gleich dicken Lagen jeweils mit aufgelegter Stahlplatte, um eine gleichmäßige Verdichtung über die gesamte Querschnittsfläche sicherzustellen. Jede Schicht wird mit 10 Schlägen des kleinen Proctorhammers (Typ A) verdichtet. Die eingetragene Verdichtungsarbeit A entspricht damit 40 % des Standard-Proctorversuches ($A_{Pr} \sim 0,6$ MN/m³). Die Teilchen- bzw. Aggregatgröße ist auf ≤ 10 mm begrenzt.

Erforderliche Geräte:

- Standard-Proctortopf
Durchmesser $d_i = 100$ mm, Höhe $h = 120$ mm mit 50 mm hohem Aufsatzring
- Stahlplatte
Durchmesser $d = 99,5$ mm, Höhe $h = 10$ mm
- Proctorhammer (Typ A)
Fallmasse 2,5 kg, Fallhöhe 300 mm,
Durchmesser des Aufschlagstückes 50 mm

Vor der Messung der Flügelscherfestigkeit ist die Masse des Prüfkörpers für die Ermittlung der Dichte ρ nach DIN 18 125-1 zu ermitteln. Die Wassergehaltsbestimmung nach DIN 18 121-1 ist an mindestens der Hälfte des Probenmaterials nach Abschluss der Versuche vorzunehmen.

8.4.3 Einaxialer Druckversuch

Die Herstellung der Prüfkörper erfolgt in einem gegenüber DIN 18 127 modifizierten bzw. kleineren Proctortopf. Die Verdichtung erfolgt in drei gleich dicken Lagen jeweils mit aufgelegter Stahlplatte, um eine gleichmäßige Verdichtung über die gesamte Querschnittsfläche sicherzustellen. Jede Schicht wird mit 10 Schlägen eines gegenüber DIN 18 127 modifizierten Proctorhammers verdichtet. Die volumenbezogene Verdichtungsarbeit soll in Anlehnung an DIN 18 127 40 % von $A_{Pr} = 0,6$ MN/m³ betragen. Die Teilchen- bzw. Aggregatgröße ist auf ≤ 5 mm begrenzt.

Erforderliche Geräte (s. Abb. 8.1):

- Verkleinerter Proctortopf
Durchmesser $d = 50$ mm, Höhe $h = 100$ mm mit 50 mm hohem Aufsatzring
($h/d = 2,0$)
- Stahlplatte
Durchmesser $d = 49,5$ mm, Höhe $h = 8$ mm
- Verkleinerter Proctorhammer
Fallmasse $M = 500$ g, Fallhöhe $H = 310$ mm,
Durchmesser des Aufschlagstückes $d = 25$ mm
Federkonstante: 0,125 KN/m



Abb. 8.1: Verdichtungsbehälter und -geräte zur Prüfkörperherstellung bei der Bestimmung der Einaxialen Druckfestigkeit von Schlämmen (\varnothing 50 mm)

Um den Prüfkörper ungestört aus dem Versuchszylinder entnehmen zu können, empfiehlt es sich, 2 Halbschalen als Zylinder zu verwenden und/oder einen Auspressbolzen von 49,5 mm Außendurchmesser und 120 mm Höhe einzusetzen. Zur Reduzierung der Mantelreibung oder Haftung sollte ein Gleitmittel oder Folie eingesetzt werden.

Vor der Messung der Einaxialen Druckfestigkeit ist die Dichte ρ nach DIN 18 125-1 zu bestimmen und nach dem Versuch eine Wassergehaltsbestimmung nach DIN 18 121-1 von mindestens der Hälfte des Probenmaterials vorzunehmen.

8.5 Prüfzeitpunkt

Die Versuche zur Bestimmung der Flügelscherfestigkeit und zur Bestimmung der Einaxialen Druckfestigkeit sollen ca. 1 Stunde nach Herstellung der Prüfkörper abgeschlossen sein.

8.6 Versuchsdurchführung

8.6.1 Flügelscherversuch

Der gemäß Abschn. 8.4.2 hergestellte Prüfkörper wird zur Versuchsdurchführung im Proctortopf belassen und in das Versuchsgerät eingesetzt. Der Flügel zur Ermittlung der Flügelscherfestigkeit soll folgende Abmessungen aufweisen:

- Durchmesser: $d = 12,5 \text{ mm } (\pm 0,3 \text{ mm})$
- Höhe: $h = 25,00 \text{ mm } (\pm 0,6 \text{ mm})$
- $h / d = 2,0$.

Die Eindringtiefe des Flügels in den verdichteten Prüfkörper soll bei jedem Einzelversuch 50 mm betragen ($= 2 \cdot h$ des Flügels). Eine Markierung an dem Flügelgestänge ermöglicht eine genaue und vergleichbare Eindringtiefe für jeden Einzelversuch (Abb. 8.2).

Die Drehgeschwindigkeit des Flügels soll konstant $\omega = 10^\circ/\text{min}$ betragen. Die Anordnung der Einstichpunkte der 3 Einzelversuche auf der Prüfkörperoberfläche ist in Abb. 8.3 dargestellt.



Abb. 8.2: Laborflügelsonde zur Messung von τ_{FS} (Flügel noch nicht in die Probe eingestochen)

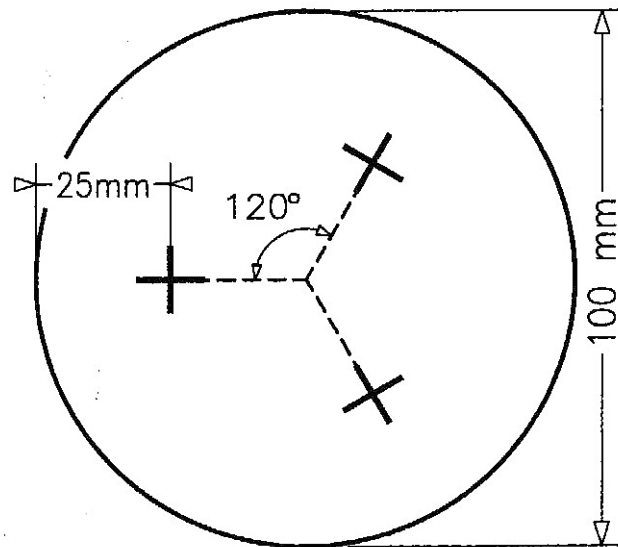


Abb. 8.3: Verteilung der Einzelversuche ($n =$) auf die Prüfkörperoberfläche

8.6.2 Einaxialer Druckversuch

Zur Bestimmung der Einaxialen Druckfestigkeit werden 3 Einzelversuche an nach Abschn. 8.4.3 hergestellten Prüfkörpern durchgeführt. Der Versuchsablauf erfolgt in Anlehnung an DIN 18 136. Abweichend von der Norm ist unabhängig von der zu erwartenden Stauchung des Probekörpers grundsätzlich eine Vorschubgeschwindigkeit von $v = 1\%$ von h_a/min ($= 1 \text{ mm/min}$) einzuhalten, mit $h_a =$ Anfangshöhe des Prüfkörpers.

8.7 Versuchsauswertung / Dokumentation

8.7.1 Flügelscherfestigkeit

Die Flügelscherfestigkeit τ_{FS} für den Flügel nach Abschn. 8.6.1 berechnet sich nach folgendem Formelansatz:

$$\tau_{FS} = \frac{6 \cdot M}{7 \cdot \pi \cdot d^3} \quad [\text{kN/m}^2]$$

Hierin bedeuten:

d = Durchmesser des Flügels [m]

M = maximal ermitteltes Drehmoment [kN · m]

Die Flügelsonde ist so entworfen, dass sie nur für weiche bis maximal steife Böden geeignet ist. Damit ergibt sich als obere Grenze der Scherfestigkeit etwa ein Wert von ca. 100 kN/m².

8.7.2 Einaxialer Druckversuch

Als Ergebnis ist der Mittelwert von q_u aus den 3 Einzelversuchen anzugeben:

$$q_u = \frac{F}{A_a} \cdot (1 - \varepsilon) \quad [\text{kN/m}^2]$$

Hierin bedeuten:

F = max. Prüfkraft

A_a = Querschnitt des Probekörpers bei Versuchsbeginn

ε = Stauchung bei F

Bei nicht ausgeprägtem Bruchpunkt wird die maximale Prüfkraft als die Kraft festgelegt, die bei einer Grenzstauchung von $\varepsilon = 20 \%$ registriert wird.

Die Druck-Stauchungslinien der Einzelversuche sind dem Auswerteprotokoll beizufügen.

8.8 Indexparameter, korrelative Beziehungen

Die Festlegung von Grenzwerten für einfacher zu bestimmende Indexparameter für die Eingangskontrolle kann für ausgewählte Schlämme, die hinsichtlich ihrer chemischen Beschaffenheit, granulometrischen Zusammensetzung und Anlieferungswassergehalte nur sehr geringe Schwankungen aufweisen, sinnvoll sein. Die einfacher zu bestimmenden Indexparameter (z.B. Wassergehalt, Trockendichte ρ_d) sind häufig signifikant mit den Zielgrößen τ_{FS} oder q_u verknüpft (z.B. $q_u = f(w)$).

Diese Abhängigkeiten sind auf der Grundlage der nach Abschn. 8.6 durchzuführenden Untersuchungen sowie ergänzenden Untersuchungen zur Bestimmung kennzeichnender Parameter festzulegen. Die Kontrolle kann sich dann neben der visuellen Beurteilung auf eine ausschließliche Kontrolle z.B. des Anlieferungswassergehaltes beschränken.

8.9 Arbeitsschutz

Vor Aufnahme der Untersuchungen ist hinsichtlich der zu untersuchenden Stoffe eine Gefährdungsbeurteilung nach Gefahrstoffverordnung in der jeweils aktuellsten Fassung durchzuführen. Erste Hinweise können das Sicherheitsdatenblatt und die Deklarationsanalysen, die dem zu prüfenden Material beizufügen sind, liefern. Im Einzelfall kann es erforderlich sein, weitere Informationen zu beschaffen. Die Verantwortung für die zu ergreifenden Arbeitsschutzmaßnahmen liegen im Verantwortungsbereich der jeweiligen Prüfstelle.

Die Entsorgung der geprüften Materialien unter Einhaltung der gültigen Vorschriften ist sicherzustellen.

9 Literaturverzeichnis

Rechtsvorschriften

TA ABFALL (1991) -. Zweite Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall Teil 1): Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen und biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen vom 12. März 1991 (GMBI. S. 139)

TA SIEDLUNGSABFALL (1992) - Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Siedlungsabfall) - Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen vom 14. Mai 1993, BAnz. 99a

AbfAbIV (2001) - Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen und über biologische Abfallbehandlungsanlagen (Abfallablagerungsverordnung-AbfAbIV) vom 20. Februar 2001, BGBl. S. 305

Richtlinien

Richtlinie der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA): PN 2/78 - Entnahme und Vorbereitung von Proben aus festen, schlammigen und flüssigen Abfällen

Richtlinie der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA): PN 2/78 K - Grundregeln für die Entnahme von Proben aus Abfällen und abgelagerten Stoffen

Arbeitsblätter, DIN-Normen

ATV-VKS - Arbeitsblatt A 301 - Gelbdruck, Klärschlammeinbau in Deponien.

DIN 1055, T2 (1976) - Lastannahmen für Bauten, Bodenkenngrößen, Wichte, Reibungswinkel, Kohäsion, Wandreibungswinkel

DIN 4096 (1980) - Baugrund; Flügelsondierung; Maße des Gerätes, Arbeitsweise, Auswertung

DIN 18 121, Teil 1 (1976). - Wassergehalt, Bestimmung durch Ofentrocknung

DIN 18 122, Teil 1 (1976) - Zustandsgrenzen,(Konsistenzgrenzen), Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze (Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte)

DIN 18 125, Teil 1 (1986). - Baugrund; Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Dichte des Bodens

DIN 18 126 (1989) - Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester Lagerung (Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte)

DIN 18 127 (1993) - Proctorversuch (Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte)

DIN 18 136 (1987) - Bestimmung der Einaxialen Druckfestigkeit (Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte)

DIN 18 196 (1988) Erd- und Grundbau; Bodenklassifizierung für bautechnische Zwecke

DIN 52 010 (1980) - Prüfung bituminöser Bindemittel; Bestimmung der Nadelpenetration

DEV S2 (DIN 38414 - S2) - Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung.

Literatur

BECKEFELD (1994) - Physikalische Parameter nach Anhang B der TA Si. Probleme bei der Bestimmung und Bewertung. In: LUA (Hrsg.): Materialien Nr. 2, Umsetzung der TA Siedlungsabfall bei Deponien.

BEHRENS (1995) - Bemerkungen zur Anwendung einiger Zuordnungskriterien für Deponien (Anhang B der TA Si). Abfallwirtschaftsjournal 7.

BENDER (1992) - Verbesserung der Deponierfähigkeit von Klärschlamm nach Trocknung. Müll und Abfall 4

BISHOP (1966) - The strength of soils in engineering materials. Geotechnique 16.

BISHOP/HILL/MOTT (1945) - The theory of indentation and hardness tests. Proc. of the Physical Society, London, Nr. 57, part 3, No. 321.

BJERRUM/KENNEY (1967) - Effect of structure on the shear behaviour of normally consolidated quick clays. Geotech. Conf. Oslo, Vol. 2.

- BJERRUM (1967) - Engineering Geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings. *Geotechnique* 17.
- BJERRUM (1973) - Problems of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils. Proc. of the 8th Int. Conf. of Soil Mech. and Found. Eng., Moskau.
- BRINCH/HANSEN/LUNDGREN (1960) - Hauptprobleme der Bodenmechanik. Springer-Verlag.
- CADLING/OSTENSTAD (1950) - The vane borer. Apparatus for determining the shear strength of clay soils directly in the ground. Royal Swedish Geotechnical Institute, Stockholm.
- CARRIER/BECKMANN (1984) - Correlation between index tests and properties of remoulded clays. *Geotechnique* 34.
- DEMBEG (1993) - Flügelsondierungen als Kontrolluntersuchungen in einer Klärschlamm-Monodeponie - Ergebnisse und Erfahrungen. *Müll und Abfall*, 11.
- DIETL/LINDNER (1995) - Festigkeitsuntersuchungen an Metallhydroxidschlämmen. *Müll und Abfall* 3.
- DRESCHER (1988) - Festigkeit von abzulagernden Schlämmen. Fortschritte der Deponietechnik. HdT Essen, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Heft 23, Erich Schmidt Verlag.
- DÜLLMANN (1985) - Bodenphysikalische Untersuchung und Bewertung von mineralischen Stoffen für Deponie-Basisabdichtungen (unveröffentlichter Forschungsbericht im Auftrag des LUA, NRW).
- DÜLLMANN (1996) - Verbesserung der Standsicherheit im Deponiebau mit Geokunststoffen. Vortrag Braunschweiger Deponieseminar.
- DÜLLMANN (1998) - Bericht „Festigkeitsuntersuchungen an Abfällen nach TA Siedlungsabfall Anhänge B und D und TA Abfall Anhänge A und B“ (unveröffentlicht).
- EARTH MANUAL (1974) - A water resources technical publication. U. S. Department of the Interior.
- FLAATE (1965) - A statistical analysis of some methods for shear strength determination in soil mechanics. Norwegian Geotechnical Institute. Vol. 62.
- GAY (1990) - Scherparameter von Müll- und Klärschlämmen. Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, Heft 31.
- GERSCHNER (1984) - Verfestigung von Sonderabfällen. *Müllhandbuch*, Bd. 5, 8134.
- GUDEHUS/LEINENKUGEL (1978) - Fließdruck und Fließbewegungen in bindigen Böden. Vorträge Baugrundtagung Berlin.
- GUDEHUS (1981) - *Bodenmechanik*. Enke-Verlag, Stuttgart.
- HANSBO (1957) - A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall-cone test. Royal Swedish Geotechnical Institute Proceedings, Nr. 14, Stockholm.

-
- HILL (1950) - The Mathematical Theory of Plasticity. Oxford.
- HORN (1990) - Erfahrungen mit einer Monodeponie für kalkstabilisierte Klärschlämme. 6. Nürnberger Deponieseminar, LGA.
- HVORSLEV (1960) - Physical components of the shear strength of structured clays. Proc. ASCE Research Conf. on shear strength of cohesive soils - Boulder Colorado.
- HVORSLEV (1949) - Subsurface exploration and sampling of soils for civil engineering purposes. ASCE Report, Waterways Experiment Station, Vicksburg.
- JAKY (1944) - Bodenmechanik. Budapest.
- JONES (1968) - Deep sounding - its value as a general investigation technique to friction ratios and their accurate determination. 6. Regional Conf. for Africa on SMFE, Durban. SA.
- KARLSSON/VIBERG (1967) - Ratio c_u/σ in relation to liquid limit and plasticity index with reference to Swedish clays. Proc. Geot. Conf. Oslo, Norway, Vol. 1.
- KEZDI (1969) - Handbuch der Bodenmechanik. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- KOMODROMOS (1992) - Beurteilung der Deponierfähigkeit von Abfällen - Methodik zur Bewertung des mech. Verhaltens. Müll und Abfall 3.
- KOMODROMOS (1987) - Beitrag zur Festigkeitsbeurteilung von Abfällen und Schlämmen. Müll und Abfall 2.
- KORHONEN (1963) - Über die Zusammendrückung von Bodenarten. Europäische Baugrundtagung Wiesbaden, Vol. I.
- LADD/FOOTT (1974) - New design procedure for stability of soft clays. Journal Geotechn. Eng. Div. Vol. 100.
- LADD et al. (1977) - Closure to Main Session I State-of-the Art-Report. Stress Deformation and Strength Characteristics. 9th ICSMFE, Tokyo, Vol. 3.
- LAMBE/WHITMAN (1969) - Soil mechanics. John Wiley, New York.
- LEINENKUGEL (1976) - Deformations- und Festigkeitsverhalten bindiger Erdstoffe. Experimentelle Ergebnisse und ihre physikalische Deutung. Veröff. des Inst. für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, Heft 66.
- LEUSSINK et al. (1964) - Beitrag zur Kenntnis der bodenphysikalischen Eigenschaften von Mischböden. Veröffentl. d. Inst. f. Bodenmechanik u. Grundbau, TH Karlsruhe, Heft 15.
- LO/LOVELL (1983) - Prediction of soil properties from simple indices. Transportation Research Record 873.
- MATTHES (1990) - Betriebserfahrungen mit Klärschlämmen - Monodeponien. 6. Nürnberger Deponieseminar, LGA.
-

- PERLOW/RICHARDS (1977) - Influence of shear velocity on vane shear strength. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103.
- ROLL/MREZAR (1996) - Bestimmung der Festigkeit von pastösen Abfällen. Abfallwirtschaftsjournal II.
- SALENCON (1966) - Expansion quasi - statique d'une cavité à symétrie sphérique ou cylindrique dans un milieu elasto-plastique. Annales des Ponts et Chaussées 3.
- SCHULTZE/MUHS (1967) - Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten. 2. Auflage, Berlin/Heidelberg/New York.
- SCHULTZE (1975) - Some aspects concerning the application of statistics and probability to foundation structure. Proc. 2nd. Int. Conf. Application of statistics and probability in soil, Aachen.
- SKEMPTON (1948) - The $\phi = 0$ -analysis of stability and its theoretical basis. Proc. 2nd ICSMFE Vol. II, Rotterdam.
- SOWERS (1961) - Introductory soil mechanics and foundations. New York.
- STRIEGLER (1969) - Dammbau in Theorie und Praxis. Springer Verlag.
- TERZAGHI/PECK (1967) - Soil mechanics in engineering practice. 2d ed. John Wiley and Sons Inc. New York.
- TORSTENSSON (1977) - Time-dependent effects in the field vane test. Proc. of the Int. Symp. on soft clays, Bangkok, Thailand.
- VÖLKER (1997) - Schnellmethode für die Festigkeitskontrolle von Abfällen vor Ort. Entsorgungs-Praxis 5.
- VON BLOH/BLÜMEL (1992) - Ermittlung der Scherfestigkeit von abzulagerndem Klärschlamm mit der Flügelsonde. Müll und Abfall 4.
- WROTH/WOOD (1978) - The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils. Canadian Geotechnical Journal 15.
- ZWECK (1969) - Baugrunduntersuchungen durch Sonden. Verlag Ernst und Sohn, Berlin/München.